ELEKTRONARKOSE

GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG
UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN MIT GLEICHSTROM
ÜBERLAGERTEM RECHTECKIMPULSWECHSELSTROM
UND MIT SINUSWECHSELSTROM

---

von

Gerhard Endsberger

aus Nürnberg

1963

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41535718_0003

Aus der Abteilung für Anaesthesiologie
bei der Chirurgischen Klinik
der Universität Erlangen-Nürnberg
Vorstand: Prof. Dr. E. Rügheimer

ELEKTRONARKOSE

GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG UND EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN MIT GLEICHSTROM ÜBERLAGERTEM RECHTECKIMPULSWECHSELSTROM UND MIT SINUSWECHSELSTROM

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
zu Erlangen-Nürnberg

vorgelegt von

Gerhard Endsberger

aus Nürnberg

Gedruckt mit Erlaubnis der Medizinischen
Fakultät der Universität Erlangen-Nürnberg

Dekan: Prof.Dr.med. Ober
Referent:Prof.Dr.med.Rügheimer
Tag der mündlichen Prüfung:14.8.1967

INHALTSVERZEICHNIS

E I N L E I T U N G

G E S C H I C H T L I C H E R T E I L

I. Geschichtliche Entwicklung bis Leduc 1
A. Anfänge der Elektromedizin 1
B. Anfänge der Elektronarkose 2

II. Klinische Kriterien und Symptome der Elektronarkose bei Verwendung verschiedener Stromarten 7
A. Die für die Elektronarkose hauptsächlich verwendeten Stromarten 7
1. Gleichstrom 7
2. Unterbrochener Gleichstrom 16
a. Rechteckimpulsstrom 16
b. Gleichgerichteter Sinuswechselstrom 21
c. Logarithmisch ansteigende Stromimpulse 22
d. Dreiecksimpulse 22
3. Sinuswechselstrom 27
4. Kombinierte Ströme 34
a. Gleichstrom plus Sinuswechselstrom 34
b. Gleichstrom plus Rechteckimpulsstrom 34
c. Gleichstrom plus Breitbandrauschen 39
d. Rechteckimpulsstrom plus Breitbandrauschen 39
B. Betäubung mit kurzzeitig fließenden Strömen 43
C. Elektronarkoseversuche an Menschen 45

III. Physikalische und chemische Grundlagen 55
A. Die Bedeutung der Stromkurve 55
1. Die unterschiedliche Wirkung von Gleichstrom und Impulsströmen 55
2. Die Bedeutung des Gleichstromes bei den kombinierten Strömen 56
3. Die Bedeutung der Anstiegsgeschwindigkeit der Stromimpulse 56
4. Die Bedeutung der Impulsdauer 57

5. Die Bedeutung der Frequenz 61
a. Bei Rechteckimpulsströmen 61
b. Bei Sinuswechselströmen 64
B. Über die Elektrodenlokalisation 65
1. Lokalisation beider Elektroden in der Peripherie; Elektrische Lokalanästhesie 65
2. Lokalisation der Elektroden nur über dem Rückenmark. Spinalanästhesie 67
3. Lokalisation der Elektroden an Kopf einerseits und Rücken bzw. Peripherie andererseits. 67
4. Lokalisation der Elektroden nur am Kopf 69
C. Die intrakranielle Stromverteilung 71
D. Die Beeinflussung der Elektronarkose durch pharmakologische Mittel. 73
E. Über die Produktion von Krampfstoffen oder Schlafstoffen während der elektrischen Durchströmung im ZNS. 74
IV. Die anatomischen und physiologischen Veränderungen infolge der Elektronarkose. 75
A. Veränderungen am Gehirn 75
1. Anatomisch-pathologische Veränderungen. 75
a. Veränderungen am Gefäßsystem 76
b. Veränderungen an den Ganglienzellen 79
2. Veränderungen der zerebralen Hämodynamik 80
3. Veränderungen des Gehirnstoffwechsels 81
4. Veränderungen der elektrischen Aktivität 82
a. Das EEG-Verhalten nach elektrischer Durchströmung 82
b. Das EEG-Verhalten während der Elektronarkose 84
c. Evoked potentials während der Elektronarkose 86
5. Veränderung der motorischen Reizschwelle während der Elektronarkose. 86
B. Veränderungen des Kreislaufes und der Herzfunktion. 87
1. Blutdruck 87
2. Puls, Herzrhythmus 89
3. Elektrokardiogramm 90

C. Veränderung der Atmung 91
1. Atemrhythmus, Atemmechanik, Minutenvolumen 91
2. Sauerstoff- und Kohlendioxydaustausch; Respiratorischer Quotient. 92
3. Sauerstoff- und Kohlendioxydgehalt im Blut 93
D. Veränderungen des Blutes 94
1. Geformte Bestandteile 94
2. Blutzucker 95
3. Fermente 95
E. Veränderungen der endokrinen Drüsen 96
1. Schilddrüse. 96
2. Nebennieren. 96
F. Veränderung der Nierenfunktion 97
1. Harnstoffspiegel im Blut. 97
2. Clearance (Kreatinin). 97
G. Einfluß auf die Schwangerschaft. 97
V. Theorien der Elektronarkose. 98
A. Die polarisierende Wirkung des elektr. Stromes 98
1. Hyperpolarisation. 98
2. Depolarisation. 99
B. Erschöpfung des ZNS. 99
C. Ausschaltung der Integrations- und Assoziationsfähigkeit des ZNS. 99
D. Erregung von Hemmungszentren. 100
E. Entstehung von nicht lokalisierten Hemmungsmechanismen. 100
1. Parabiose nach Wedenski. 101
2. Überlastungshemmung nach Pavlow. 101

E X P E R I M E N T E L L E R T E I L

I. Aufgabenstellung 102

II. Methodik 103

a. Elektronarkosegerät nach der Methode von Smith, zur Erzeugung einer kombinierten Spannungsform mit rechteckförmiger Wechselspannung und Gleichstromgrundpegel. 103

b. Elektronarkosegerät nach der Methode von Hardy, Fabian, zur Erzeugung eines Sinuswechselstromes 109

c. Elektrodentechnik 113

1. Elektrodenhalterung 113

2. Elektrodenmaterial 114

3. Elektrodenanordnung 114

d. Fixation der Tiere 114

III. Versuchsergebnisse: 115

Teil 1

a. Elektronarkoseversuche nach der Methode von Smith 115

b. Der Einfluß des Gleichstromes auf die Elektronarkose. 134

c. Elektronarkoseversuche nach der Methode von Smith mit Impulsströmen einer Frequenz von 500 Hz. 138

d. Einfluß der Elektrodenanordnung 141

e. Nachteile bei der Implantation der Narkoseelektroden. 143

Teil 2

Elektronarkoseversuche nach der Methode von Hardy, Fabian. 700 Hz Sinuswechselstrom 144

Teil 3

Potentialmessungen im Hundehirn während der Elektronarkose. 149

a. Minimale Rechteckwechselstromstärke, die gerade noch das Schädelinnere erreicht. 149

b. Nachweis eines Gleichstromflußes im Inneren des Hundeschädels während der Elektronarkose. 150

c. Verteilung der Stromstärke im und am Hundeschädel während der Elektronarkose 151
d. Das Verhältnis der spontanen biologischen Gehirnpotentiale zu den Potentialausschlägen, die im Gehirn während einer Elektronarkose gemessen werden. 156

IV. Diskussion der Versuche 158

V. Zusammenfassung 165

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S 168

E I N L E I T U N G

Schon seit etwa 70 Jahren bemüht man sich, mit Hilfe elektrischer Hirndurchflutung eine Narkose hervorzurufen. Trotz zahlreicher Untersuchungen gelang es bisher nicht, die Elektronarkose für praktisch-klinische Zwecke anzuwenden. In jüngster Zeit erwachte wieder ein lebhaftes Interesse, als Anan'ev und Smith von einer neuen Stromart berichteten, die bei weitem erfolgversprechender war, als die bisher angewandten Stromformen. Die amerikanische Arbeitsgruppe um Hardy und Fabian hatte sogar mit einem Sinuswechselstrom erfolgreiche Elektronarkosen bei Operationen an Menschen durchgeführt.

Diese Veröffentlichungen gaben den Anlaß, eigene Untersuchungen durchzuführen.

Im ersten Abschnitt der Arbeit sollte die geschichtliche Entwicklung der Elektronarkose dargelegt werden, um durch Zusammenstellung der bisherigen Ergebnisse ein umfassendes Bild der Elektronarkose zu bekommen.

Im zweiten Teil sollte im Experiment untersucht werden, ob mit Gleichstrom überlagertem Rechteckimpulswechselstrom und mit Sinuswechselstrom eine Elektronarkose zu erreichen ist.

G E S C H I C H T L I C H E R T E I L

I.GESCHICHTLICHE ENTWICKLUNG BIS LEDUC

A. Anfänge der Elektromedizin

Wie viele unserer modernen wissenschaftlichen Errungenschaften, so hat auch die Elektromedizin, d.i. die Verwendung des elektrischen Stromes als diagnostisches und therapeutisches Hilfsmittel, ihren Ursprung im Altertum. So empfahl Scriponius Largus um 50 n. Chr. zum ersten Mal in der Geschichte der Medizin die Elektrizität zur Heilung von Neuralgien. Bei Kopfschmerzen sollte man den schwarzen Zitterrochen solange auf die schmerzende Stelle legen, bis diese von den elektrischen Schlägen des Fisches betäubt sei. Auch zur Therapie der Ischias wurde der Zitterrochen angeraten. Freilich, von dem wahren Charakter der Wirkung der elektrischen Fische ahnte man damals nichts, sondern man nahm an, daß es sich um eine Art giftiger Emanation handele. Erst Adanson 1751 konnte zeigen, daß die Entladungen der Zitterfische mit denen einer Leydener Flasche identisch sind.

Erst Mitte des 18. Jahrhunderts wurde durch die Veröffentlichung von Galvanis Schrift: "De Viribus Electricitatis in Motu Musculari Commentarius" im Jahre 1791 der Elektromedizin ein gewaltiger Anstoß gegeben. Es entwickelte sich in der Folgezeit das, was man mit "Galvanismus" bezeichnete: Das Gehirn wurde als Sammelstelle der Elektrizität angesehen, wovon sie in den Körper ströme. Die Elektrizität brachte man in Zusammenhang mit einem Fluidum, das der Lebenskraft sehr nahe stehen soll. Auch glaubte man eine Verwandtschaft mit dem Messmerschen Magnetismus. Das unmittelbare Ergebnis war ein Aufkommen von therapeutischen Methoden und Schwindeleien. Seit Remak R. (1815-1865) die Elek-

trizität in größerem Umfange in die Therapie der Nervenkrankheiten einführte, wurde die Elektrotherapie zu einem integrierten Bestandteil der allgemeinen Medizin.

B. Anfänge der Elektronarkose

1. Ethymologie des Wortes "Narkose"

Daß die Wirkung des elektrischen Stromes auf den lebenden Organismus den Griechen im Altertum wohl bekannt war, geht schon aus der ethymologischen Ableitung des Wortes "Narkose" von dem griechischen "ναρκη" hervor, welches sowohl der "Zitterfisch", als auch das "Erstarren", die "Lähmung" bedeutet.

Aus diesem Grunde soll im Folgenden für den narkoseähnlichen Zustand, der durch den elektrischen Strom hervorgerufen werden kann, der Terminus "Elektronarkose" gebraucht werden und nicht, wie vor allem im neueren amerikanischen Schrifttum, "elektrische Anästhesie" (electrical anesthesia, Fabian, Hardy; Wood, Powers; McIntyre;) oder "Elektroanästhesie" (electronesthesia, Price, Dornette;)

2. Die ersten Versuche, die mit Elektronarkose indirekt zu tun hatten

Freilich setzte die Forschung über das Problem der Elektronarkose erst ein, als man begann, bewußt und systematisch die Wirkung der neu entdeckten Elektrizität auf den lebenden Organismus zu studieren.

So fiel Nobili (1830) bei Versuchen an Fröschen auf, daß deren Krämpfe, die durch die Durchtrennung des Rückenmarkes verursacht worden waren, durch den galvanischen Strom, der in einer bestimmten Richtung durch den Tierkörper floß, beruhigt werden konnten, während sich bei Stromfluß in der anderen Richtung keine Veränderungen zeigten.

1843 fand Unger, daß einzellige Lebewesen in einem Gleichstromfeld vom negativen Pol angezogen wurden und daß bei Schwärmsporen der Alge Vaucheria clavata in der Nähe beider Pole Bewegungslosigkeit auftrat.

"Über die krampfstillende Wirkung des konstanten elektrischen Stromes" veröffentlichte J. Ranke (1866) eine Arbeit, nachdem von Matteucci, Boris Reymond und Plüger ähnliche Entdeckungen gemacht worden waren. Die tetanischen Krämpfe von Fröschen, die mit Strychnin vergiftet worden waren, konnten durch eine Gleichstrombehandlung besänftigt werden. Durch genügend starke Ströme in aufsteigender (d.h. die Kathode liegt am oberen, die Anode am unteren Teil des Körpers) und absteigender Stromrichtung (Anode oben, Kathode unten) könnten die Reflexe auf taktile und Säurereize zum Verschwinden gebracht werden.

3. Die ersten Elektronarkoseversuche

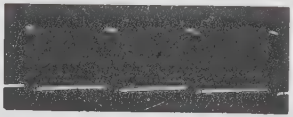
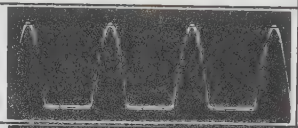
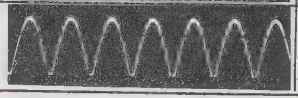
Im Jahre 1875 wurde von Mach das erste Mal von einem Betäubungszustand berichtet, der an Fischen durch einen Gleichstrom erzeugt wurde. An dem Aquarium war ein Gleichstromfeld angelegt, unter dessen Einfluß die Tiere sich in der Richtung des positiven Poles auf den Rücken legten und unbeweglich und reaktionslos wurden.

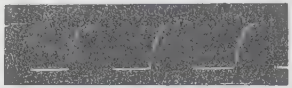
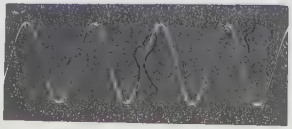
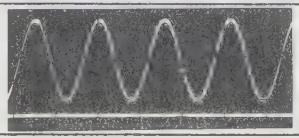
Durch Verabreichung eines Faradischen Stromes erzielte Araya (1882) an Fröschen, Ratten, Kaninchen, Hunden und Geisteskranken narkoseähnliche Zustände. Doch waren die Erregungserscheinungen wegen der bei dieser Stromart auftretenden sehr starken Spitzenströme beträchtlich.

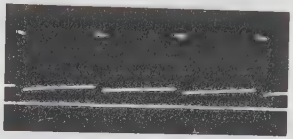
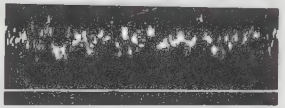
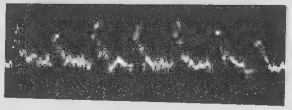
1890 benützte D'Arsonval hochfrequente, unterbrochene Gleichströme, für eine Elektronarkose an Kaninchen.

Seitdem aber Leduc um 1900 mit seinen aufsehenerregenden Versuchen begonnen hatte, erschienen zahlreiche Veröffentlichungen über dieses Gebiet.

Tabelle 1: Übersicht über die bisher für die Elektronarkose verwendeten Stromarten

Stromart	Parameter der Stromform	Die ersten Untersucher
Gleichstrom		Mach 1875
Rechteckimpulsstrom 	Frequenz: 100 Hz Impulsdauer: 1 msec Frequenz: 100 Hz Impulsdauer: 0,5; 1,9; 3,5; 5,9; 8 msec Frequenz: 25-23ooo Hz Impulsdauer: 1; 2,2; 5; 6; 7,8 msec	Leduc 1902 v. Neergard 1922 Sack Koch 1933
Gleichgerichteter Sinuswechselstrom. Einweggleichricht. 	Frequenz: 10-400 Hz	Clark, Wall 1934
Zweiweggleichrichtung 	Frequenz: 50 Hz	Scheminzky 1938

Stromart		Parameter der Stromform	Die ersten Untersucher
logarithmisch ansteigende Stromimpulse		Frequenz: 100–120 Hz Impulsdauer (auf dem Maximum): 0,8–1,3 msec	Rose, Rabinov 1945
Dreiecksimpulse		Frequenz: 1–10000 Hz	v. Poznak 1963
Sinuswechselstrom		Frequenz: 50 Hz Frequenz: 30–8000 Hz Frequenz: 700 Hz	Bockelmann 1902 Scheminzky 1924 v. Harreveld 1942 Knutson 1954
Kombinierte Ströme Gleichstrom plus Sinuswechselstrom		Frequenz: 50 Hz	Nicolai 1930

Stromart	Parameter der Stromform	Die ersten Untersucher
Gleichstrom plus Rechteckimpulsstrom 	Frequenz: 100 Hz Impulsdauer: 1-1,4 msec Frequenz: 66; 100; 526; 700 Hz Impulsdauer: 0,7; 0,8; 1; 2; 3 msec Frequenz: 200 Hz Impulsdauer: 1,2 msec Frequenz: 500-700 Hz Impulsdauer: 0,1-0,2 msec	Anan'ev 1957 Klemm 1964 McIntyre 1965 Smith 1965
Gleichstrom plus Breitbandrauschen 	Frequenzbereich: 0 - 50 KHz	Wageneder 1965
Rechteckimpuls plus Breitbandrauschen 	Frequenzbereich: 0 - 500 KHz Überlagert mit Rechteckimpuls: Frequenz: 100,200 Hz Impulsdauer: 2; 1 msec	McIntyre 1965

II. KLINISCHE KRITERIEN UND SYMPTOME DER ELEKTRONARKOSE BEI VERWENDUNG VERSCHIEDENER STROMARTEN

A. Die für die Elektronarkose hauptsächlich verwendeten Stromarten

1. Gleichstrom (Galvanonarkose)

Der lähmenden Wirkung des Gleichstromes auf den tierischen Organismus waren die ersten Untersuchungen gewidmet, die sich mit der Frage, ob mit dem elektrischen Strom eine Narkose zu erreichen sei, beschäftigten.

1885 konnte Hermann an Froschlarven und Lachsembryonen die Beobachtungen von Mach an Fischen bestätigen. Bei Schließung des Stromkreises wandten sich die Tiere mit dem Kopf der Anode, mit dem Schwanz der Kathode zu, wobei sie in einen lähmungsartigen, vollkommen ruhigen Zustand verfielen. Wenn der Kopf dagegen in der Nähe der Kathode lag, schwammen sie in beständiger Unruhe hin und her, während sie bei höheren Stromstärken steif und unbeweglich wurden. Die "galvanotropische Reaktion", wie Hermann die Ausrichtung der Tiere im Gleichstromfeld und die Unbeweglichkeit bezeichnete, erfolgte also nur bei absteigender Stromrichtung.

Onimus und Legros (1888) unternahmen Versuche an Hunden und Menschen, wobei die Elektroden auf dem Rücken entlang der Wirbelsäule lagen. Der Strom in absteigender Richtung, (d.h. die Elektroden sind so gepolt, daß die Anode über den oberen, die Kathode über den unteren Teil des Rückenmarkes zu liegen kommt) dämpfte deutlich die Reflexe und beruhigte die Versuchsobjekte. Die Wirkung sei mit der von Chloral zu vergleichen. Dagegen bewirkte eine aufsteigende Stromrichtung (d.h. die Kathode liegt über dem oberen, die Anode über dem unteren Teil des Rückens) eine starke Erregung und Reflexsteigerung, ähnlich wie Strychnin.

Eingehend studierten Blasius und Schweizer (1893) die Gleich-

stromwirkung auf Fische, Frösche, Salamander, Anneliden und Krebse bei Durchströmung in einem Wassertrog. Den Zustand tiefer Narkose bei absteigender Stromrichtung nannten sie "Galvanonarkose", eine Bezeichnung, die von den späteren Forschern beibehalten wurde. Zitat:"Der absteigende Strom lähmt die Hirnfunktion und unterbricht die Reflexbogen, der aufsteigende erhöht die Funktion des Hirns und des oberen Rückenmarkes und erleichtert die Reflexübertragung". Für Fische (Leuciscus idus, Cyprinus carpio) benötigte man Stromdichten von etwa 3,5 mA/qmm (δ) Wasserfläche. Wenn durch langsames Ausschleichen des Stromes, d.h. durch allmähliches Absenken der Stromstärke auf Null, der Stromkreis unterbrochen wurde, verhielten sich die Tiere weiterhin unbeweglich; ein Zustand, wofür der Terminus "Hypnose" gebraucht wurde. Durch Berührung konnte diese Hypnose wieder aufgehoben werden oder sie verschwand von selbst nach einiger Zeit. Abgekühlte Tiere konnten leichter und rascher narkotisiert werden, hatten aber auch eine erhöhte Reflexerregbarkeit in der aufsteigenden Stromrichtung.

Nagel (1895) kam bei Fischen und Amphibien zu den gleichen Ergebnissen wie die früheren Untersucher der Galvanonarkose, fand aber bei Protisten und Mollusken, daß die ... "polare Reizwirkung der Anode die der Kathode überwiegt" (Zitat), d.h. daß diese Tiere sich in entgegengesetzter Richtung im Gleichstromfeld einstellten, wie die Fische und Amphibien.

Den bisherigen Befunden widersprachen Loeb, Maxwell (1896) und Loeb, Gerry (1897) auf Grund von Versuchen an Krebsen und Amphibien. Die Unbeweglichkeit bei galvanischer Durchströmung der Tiere im Wasserbecken könne bei auf-und absteigender Stromrichtung erreicht werden. Die Tiere sammelten sich zwar um die Anode, zeigten jedoch keine einheitliche Orientierung im Gleichstromfeld parallel zu den Feldlinien. Zitat: "Das Tier liegt völlig ruhig, nicht weil es gelähmt ist, sondern weil es völlig steif ist..... Die galvanotropischen Erscheinungen bei Wirbeltieren beruhen darauf, daß der konstante Strom gleichsinnige Änderungen der Spannung und der Energieent-

wicklung assozierter Muskelgruppen herbeiführt, wodurch die Bewegung gegen den einen Pol erleichtert, die Bewegung gegen den entgegengesetzten Pol erschwert wird."

Scheminzky (1924, 1931, 1936, 1938, 1941), der sich intensiv vorallem mit der Galvanonarkose beschäftigt hatte, gliederte das Verhalten von Tieren, die im Wasser in absteigender Stromrichtung durchströmt wurden, wobei die Stromstärke langsam gesteigert wurde, in drei Stadien auf:

1. sichtbare Reaktion: Excitationsstadium; das Tier zuckt mit dem ganzen Körper.
2. Reaktion: Stadium der Galvanotaxis; das Tier stellt seine Längsachse parallel zu den Gleichstromfeldlinien und richtet sich mit dem Kopf zur Anode aus.
3. Reaktion: Stadium der Galvanonarkose; das Tier zeigt weder eine Bewegung noch eine Reaktion und liegt auf der Seite.

Die Stromstärken für diese Stadien stehen bei Tieren der gleichen Art in einem bestimmten Verhältnis, d.h. die relativen Spielräume zwischen den Schwellenstromstärken, die jeweils für die einzelnen Stadien benötigt werden, sind konstant (z.B. bei dem Fisch, Cottus gobio, Länge 60-64 mm, sind die notwendigen Stromstärken für die 1. Reaktion 0,18 mA/qmm, für die 2. Reaktion 1,26 mA/qmm, für die 3. Reaktion 1,82 qmm. Diese Stromstärken, bzw. Stromdichten stehen in einem ungefähren Verhältnis von 1:6, 5:8, 8). Dabei sind die für diese Reaktionen notwendigen Stromdichten innerhalb einer Art für die größeren, bzw. älteren Tiere geringer als für kleinere.

Auf Grund der Ergebnisse von Versuchen über die Beeinflussung der Galvanonarkose durch Narkotika und Coffein (s. auch unter Kapitel II D) stellte Adler (1932) die Hypothese auf, daß diese 3 Stadien verschiedener Natur seien und daß der entsprechende Angriffspunkt des Stromes ein jeweils verschiedener ist: Die 1. Reaktion sei vom Zentralnervensystem unabhängig und beruhe auf einer Erregung der peripheren motorischen Nerven und Muskeln des Rumpfes. An der Galvanotaxis und der Galvanonarkose sei

das Zentralnervensystem beteiligt, wobei die erstere wahrscheinlich durch eine Labyrinthreizung reflektorisch ausgelöst werde, während die Galvanonarkose ihren Angriffspunkt im Gehirn und Rückenmark habe.

Zur Klärung der Frage, in wie weit das Gehirn am Zustandekommen der galvanischen Reaktionen beteiligt ist, konnte schon Hermann (1895) durch Ausschaltungversuche am ZNS nachweisen, daß die "galvanotrope Reaktion" (Erklärung s. oben) nicht muskulärer, sondern zentraler Natur und an die Existenz des Rückenmarkes gebunden ist; das Gehirn war aber für den Galvanotropismus nicht notwendig. Zu den gleichen Ergebnissen kam Scheminzky (1938), welcher Fröschen mittels Kurzwellen einerseits die Nervenwurzeln, andererseits die Rückenmarksreflexzentren zerstörte. Eindeutig konnte gezeigt werden, daß der galvanische Strom bei Tieren, die im Wasserbad durchströmt wurden, am Rückenmark angreift. Das Gehirn war am Entstehen des "Galvanischen Krampfes", der bei den Tieren in aufsteigender Stromrichtung entstand, nicht beteiligt, da die Ausschaltung des Vorderhirns oder die Durchtrennung der Medulla oblongata keine Veränderungen im Verhalten der Tiere hervorrief. Scheminzky zog den Schluß, daß der absteigende Gleichstrom auf die gleichen Zentren wirke.

Für die Galvanonarkose scheint es wesentlich zu sein, daß die Tiere ein langgestrecktes Nervensystem besitzen, da sich z. B. Seeigel nicht narkotisieren ließen; statt dessen kontrahierten sich sich (Scheminzky 1936).

Endgültig konnte Scheminzky (1936) die Ansicht von Loeb, Maxwell und Gerry, daß der auf-und absteigende Gleichstrom die selbe Wirkung habe und daß die Unbeweglichkeit der Tiere durch die starre und steife Muskulatur zu erklären sei, widerlegen. Durch Ableitung von Muskelaktionsströmen am Frosch, welchem die Elektroden am Kopf und in der Kloake angebracht worden waren, konnte nachgewiesen werden, daß im absteigendem Strom (2-3 mA) die Muskelaktivität völlig fehlt, während der

aufsteigende Strom heftige Muskelkrämpfe mit kräftigen Aktionspotentialen auslöst. Zwar verschwanden nach einiger Zeit die Krämpfe, wahrscheinlich auf Grund von Ermüdungsvorgängen, doch bei der Abnahme von Aktionsströmen konnten weiterhin fibrilläre Muskelzuckungen beobachtet werden.

Auch Silver (1939, 1941) konnte mit einem Gleichstrom eine Narkose erzielen. Er versetzte Frösche mit 3 mA, Ratten mit 12 mA, Hunde mit 45 mA in einen narkoseähnlichen Zustand. Die Kathode lag im Mund, die Anode im Anus. Um initiale Excitationen zu vermeiden, wurde der Strom langsam zugeführt; zusätzlich standen die Hunde unter einer leichten chemischen Anästhesie (30 mg/kg Körpergewicht Evipan). Nach einer bis zu 8 Stunden dauernden Gleichstromnarkose erholten sich die Frösche innerhalb von 1 Minute, die Ratten in 10 Minuten, die Hunde in 100 Minuten, doch die Reflexe erschienen bei diesen schon wieder nach 15 Minuten. Irgendeine bleibende Schädigung konnte nicht beobachtet werden. Mit Stromdichten von 1 mA/qmm Rückenmarksquerschnitt konnten alle Tiere jeder Art inaktiviert werden. Silver konnte auch die Befunde von Hermann und Scheminsky bestätigen, daß die Hemmungserscheinungen spinaler Natur sind: An Hand von Versuchen an Hunden wurde mit Hilfe von Mikoelektroden gezeigt, daß die Erregbarkeit der spinalen Nervenwurzeln während der Elektronarkose normal, aber die Reizschwelle der motorischen Neurone im Rückenmark erhöht ist.

Einen neuen Gesichtspunkt zum Problem der Elektronarkose mittels eines Gleichstromes lieferte Burge (1940, 1941, 1948) der bei seinen Untersuchungen über das elektrische Gleichstrompotential der Hirnrinde von Goldfischen, Fröschen, Hunden und Menschen entdeckte, daß das Cortexpotential, welches im Wachzustand gegenüber der Peripherie negativ ist, sich in chemischer Narkose umkehrte, also positiv wurde. Seine Annahme, daß auch mit einem Gleichstrom das corticale Gleichstrompotential positiviert werden könnte und dadurch wie in chemischer Narkose die Tiere bewegungs-und reflexlos gemacht werden könnten, untermauerte er mit einem Versuch, in welchem er einen Frosch,

dem die Anode an einem Fuß, die Kathode über dem, aber nicht in unmittelbarem Kontakt mit dem Kopf befestigt worden war, narkotisierte. Der Schädelknochen würde als ein Dielektrikum wirken, so daß in der daruntergelegenen Hirnrinde ein positives Potential induziert werden würde.

Während die bisherigen Forscher den Gleichstrom in der Längsachse durch die Tiere schickten, versuchte Harreveld (1942) eine bitemporale Elektrodenanordnung, d.h. die Elektroden waren zu beiden Seiten des Kopfes über den Schläfen angebracht. Nachdem initial 30 Sekunden lang Stromstärken von 300-500 mA verabreicht worden waren, fielen die Hunde in einen narkoseähnlichen Zustand, der mit 150-200 mA aufrechterhalten werden konnte. Dabei drehten die Tiere nach anfänglichen klonischen Zuckungen und einem 30-50 sekundigem Atemstillstand den Kopf zur Anode. Stromstärken von 500 mA führten zu den gleichen Symptomen und gefährteten das Leben nicht. Nach dem Öffnen des Stromkreises rollten die Tiere zur Kathodenseite. Die Erholungszeit war ziemlich lang.

Tabelle 2: [illegible] Elektronarkoseversuche mit Gleichstrom (Galvanonarkose).

Untersucher	Elektroden-anordnung	Versuchsobjekt	Stromstärke	Erfolg
Mach (1875)	Durchströmung im Wasser	Fische		Ausrichtung mit dem Kopf zur Anode. Guter Betäubungszustand
Hermann (1885)	Durchströmung im Wasser	Froschlarven Lachsembryonen		Unbeweglichkeit. Lähmungsartiger Zustand nur in absteigender Stromrichtung.
Onimus, Legros (1888)	am Rücken entlang der Wirbelsäule	Hund, Mensch		Reflexdämpfung. Chloralähnlicher Zustand in absteigender Stromrichtung
Blasius, Schweizer (1893)	Durchströmung im Wasser	Fische Salamander Aneliden Krebse	3,5 mA/mm^2 Wasser	Tiefe Narkose in absteigender Stromrichtung, (Galvanonarkose).
Nagel (1895)	Durchströmung im Wasser	Protisten Mollusken Fische Amphibien		Stellen sich in entgegengesetzter Richtung zum Stromfeld ein. Gute Narkose. Kopf zur Anode ausgerichtet.

Untersucher	Elektroden-anordnung	Versuchs-objekt	Stromstärke	Erfolg
Loeb (1896,1897)	Durchströmung im Wasser	Krebse Amphibien		Unbeweglichkeit in auf- und absteigender Stromrichtung. Keine einheitliche Ausrichtung. Keine richtige Lähmung, sondem Reaktionslosigkeit auf Grund der Steifheit.
Scheminzky (1924,1931, 1938,1941)	Durchströmung im Wasser	Fische und andere Wassertiere z. B. Phoxinus laevis , Froschlarven	2,15-4,71mA/ mm^2 Wasser 6 mA/mm^2 Wasser	Bei niederen Stromstärken: Excitationsstadium. Bei mittleren Stromstärken: Galvanotaxis. Bei höheren Stromstärken: Galvanonarkose. Unbeweglichkeit und Reaktionslosigkeit nur bei Tieren mit langgestreckten ZNS.
(1936)	Anode auf Kopf Kathode im Anus	Frosch Frosch	2,0-1,4 mA/ mm^2 Wasser 4 mA	Gute Narkose. Keine Muskelaktivität.
Silver (1939)	Kathode im Mund Anode im Anus	Frosch Ratte Hund	3 mA 12 mA 45 mA	Guter narkoseähnlicher Zustand bis zu 8 Std. Bei Hunden langsame Erholungszeit (100 Minuten)

Untersucher	Elektroden-anordnung	Versuchsobjekt	Stromstärke	Erfolg
Burge (1941)	Anode an einem Fuß, Kathode über dem, aber nicht in Kontakt mit dem Kopf	Frosch		Unbeweglichkeit, Bewußtlosigkeit, Narkose
Harrefeld (1942)	bitemporal	Hund	Initial 300-500 mA Dann 150-200 mA	Kopf zur Anode gewendet. Anfänglich klonische Zuckungen, Atemstillstand. Geringere Muskelzuckungen als bei Reizströmen. Langsame Erholungszeit.

2. Unterbrochener Gleichstrom

a. Rechteckimpulsstrom

1902 demonstrierte Leduc auf einem Kongreß in Bern einen Elektronarkoseversuch an einem Hund mit einer neuartigen Stromform. Auf Grund der erstaunlichen Ergebnisse Leducs, die in zahlreichen Veröffentlichungen bis 1911 publik gemacht wurden, schien es zunächst, daß eine großartige Entdeckung gemacht worden sei. Nach den Darlegungen von Leduc könne mit der von ihm erstmalig angewandten Stromart ein Schlaf mit einer idealen Anästhesie erzielt werden.

Diese Stromkurve besteht aus einem intermittierenden Gleichstrom, wobei eine Periode aus einem Rechteckimpuls von einer Dauer von 1 msec und einer Impulspause von 9 msec Dauer besteht. Daraus ergibt sich eine Periodendauer von 10 msec, ein Verhältnis von Impulsdauer zu Periodendauer von 1:10 (oder 10 %) bei einer Frequenz von 100 Hz.

Hunden, welche diese Stromart über eine Stirnkathode und einer größeren Anode über der Lendenwirbelsäule appliziert wurde, fielen bei einer (durchschnittlichen) Stromstärke von 3-4 mA in einen chloroformähnlichen Schlaf mit vollkommener Anästhesie, bei welcher alle Arten von Operationen durchgeführt werden konnten. Derselbe Zustand ist bei Kaninchen mit 1-2 mA und 6-8 Volt zu erreichen. 1 bis 2 Volt mehr genügten, um den Tod durch Atmungs-und Herzstillstand herbeizuführen. Plötzliches Einschalten der vollen Stromstärke hatte Atemstillstand, Kot- und Harnentleerung unter allgemeiner Muskelkontraktur, manchmal auch epileptiforme Anfälle zur Folge, während bei langsamer Steigerung der Stromintensität (1 Volt pro 60 sec) "..... das Tier sanft, ohne Schrei, ohne eine Bewegung der Abwehr, ohne ein Zeichen des Schmerzes in einen Zustand des Schlafes ...." (Zitat) geriet. Nach Stromunterbrechung erwachten die Tiere sofort wieder und verhielten sich im allgemeinen normal; es waren höchstens einige Tiere für kurze Zeit benommen. Die Hunde zeigten niemals auch bei häufigen Wiederholungen der Elektronarkose irgendeine Feindschaft, die auf unangenehme Erinnerungen hindeuten könnten. Tuffier und Jardy (1907) führten mit dieser

Methode an Hunden große Operationen, wie Gastroenterostomie, Pyeloektomie, Pankreatektomie durch, wobei die Betäubung sicher, vollständig, ungefährlich und zeitlich beliebig ausdehnbar gewesen sein sollte. Nach Ansicht dieser Autoren bestand eine große Breite zwischen der für Narkose notwendigen und der tödl Stromdosis.

Robinowitsch (1910) bestätigte im Wesentlichen Leducs Erfolge, bemerkte aber, daß während der Elektronarkose das Bewußtsein noch vorhanden war, da die Tiere während der Operationen auf akustische und optische Reize reagierten. Nur wenn die Tiere alleingelassen wurden, schlossen sie die Augen und fielen in Schlaf. Die Pupillen waren verengt. Die Körpertemperatur lag unter den Normalwerten.

Leclers (1910) bezeichnete die Elektronarkose mit der leducschen Versuchanordnung als die Narkosemethode der Wahl bei Tieren und als die ungefährlichste, so daß er sich auch an Versuche mit Menschen heranwagte (s. Kapitel II.C).

Engelen (1912) untersuchte die Wirkung des leducschen Stromes auf Fische, die in einem Aquarium schwammen. Er erreichte eine tiefe Narkose, wobei sich die Tiere nicht wie unter dem Einfluß eines galvanischen Stromes einheitlich im Stromfeld ausrichteten, also keine Galvanotaxis zeigten. Die Bezeichnung elektrischer Schlaf, wie er von Leduc geprägt worden ist, sei unzutreffend, da die Tiere nicht wie im Schlaf eine gewöhnliche Stellung - Rücken nach oben, Bauchseite nach unten - einnahmen, sondern wie bei einer chemischen Narkose auf der Seite lagen.

Der bisherige Optimismus bezüglich der leducschen Elektronarkose wurde in der Folgezeit erheblich gedämpft. So konnte Tschagowetz (1912) bei Katzen keine Analgesie mit der leducschen Methode bekommen. Er steigerte den Strom langsam, bis etwa bei 15-20 mA ein allgemeiner Tetanus auftrat. Ein anschließendes Absenken der Stromstärke auf 5-10 mA führte zu einem schlafähnlichen Zustand, doch ohne Analgesie. Die Reflexe waren verstärkt und die Reflexzeit verkürzt, vor allem

beim Patellarsehnenreflex. Erst wenn die Tiere lange Zeit durchströmt wurden, war die Erregbarkeit und die Schmerzempfindlichkeit herabgesetzt.

Kritisch setzte sich v. Neergard (1922) mit der leducschen Elektronarkose auseinander. Bei seinen Versuchen an Kaninchen, Katzen und Hunden mußte er im Gegensatz zu Leduc feststellen, daß auch beim langsamen Einschleichen des Stromes ein Excitationsstadium nur selten zu vermeiden war. Häufig war es sehr heftig und brutal ausgeprägt. Das Narkosestadium war gekennzeichnet durch das Erlöschen des Cornealreflexes. Oft blieb aber die Reaktion auf akustische Reize hin noch längere Zeit erhalten. Die Pupillenreflexe zeigten keine typischen Verhaltensweisen. Von einer völligen Erschlaffung der Muskulatur, wie sie Leduc angab, konnte keine Rede sein; es waren dauernd fibrilläre, vereinzelt auch choreatische Zuckungen vorhanden. Die Bauchwandmuskulatur war stark gespannt. Die Tiere atmeten gepreßt infolge eines Glottiskrampfes. Manchmal entleerten sie Kot und Harn. Meist bestand eine starke Speichelsekretion. Die Eigenreflexe waren nicht auslösbar, bis auf die der hinteren Extremität, die gesteigert waren. Auch an der Vollständigkeit der Anästhesie hegte v. Neergard Zweifel, da manche Tiere bei Nierenoperationen zuckten. Auch konnte der Befund Leducs, daß die Stromwirkung momentan vollständig reversibel sei, nicht bestätigt werden: die Tiere öffneten zwar nach einer langandauernden Elektronarkose sofort die Augen, doch der ursprüngliche Allgemeinzustand war erst nach einer viertel bis einer halben Stunde wiederhergestellt. Die Elektronarkose konnte bis auf 9 Stunden ausgedehnt werden, ohne beim Versuchtier einen bleibenden Schaden zu hinterlassen. Die zur Anästhesie notwendigen Stromstärken lagen im Durchschnitt für Kaninchen bei 1,3 mA, für Katzen bei 1,7 mA und für Hunde bei 3-6 mA. Die letale Stromdosis war meist nur um 50 % größer als die Narkosestromstärke.

Zimmermann (1928) hielt zwar die Anästhesie mit der leducschen Methode für chirurgische Eingriffe an Hunden für ausreichend, betonte aber, daß der Betäubungszustand auch bei langsamen Ein-

schleichen des Stromes nur unter allgemeinen Erregungserscheinungen und Muskelkrämpfen zu erreichen war.

Eine Spinalanästhesie mittels einer Nacken (Kathode)- Lumbalwirbel (Anode) - Elektrodenanordnung versuchten Ivy und Barry (1932) an Hunden. Zwar konnten die Tiere bei einer Spannung von 4-12 Volt eines leducschen Rechteckimpulsstromes unbeweglich und schmerzunempfindlich bei Erhaltung des Bewußtseins gemacht werden; doch hielten diese Forscher diese Methode für praktisch-chirurgische Zwecke für unbrauchbar, da die zur Analgesie notwendigen Stromstärken so hoch waren, daß eine allgemeine Muskelrigidität erzeugt wurde.

Stief (1933) konnte nur bei einigen Hunden seiner Versuchsreihe einen schlafähnlichen Zustand mit Anästhesie hervorrufen, wobei die Muskulatur nur zum Teil relaxiert war. (Elektrodenanordnung wie bei Leduc, Frequenz: 133 Hz, Impulsdauer 3-8 msec, Stromstärke: 20-30 mA). Häufig wurden verschiedene neurologische Symptome und Reizzustände vegetativer Art, wie Speichelfluß, Urination, Defäkation, erhöhte Atemfrequenz, katatonische und kataleptische Erscheinungen, tonische und klonische Krämpfe und Nystagmus beobachtet. Nach Stief ist diese (Zitat:)"..... Elektronarkose weder als reiner Schlaf, noch als reine Narkose, oder als reine Katatonie, sondern als Mischung von all diesen ....." anzusehen.

Ein sehr unangenehmes Excitationstadium war bei den Elektronarkoseversuchen von Samssonow (1933) an Hunden mit der Methode von Leduc nicht zu vermeiden. Die Tiere blieben noch einige Zeit nach Beendigung der elektrischen Durchströmung wie betäubt liegen.

Sack und Koch (1933) beobachteten bei ihren Versuchen an Kaninchen, daß die Stromzufuhr sehr schmerzhaft war, da die Tiere häufig schrieen und wimmerten. (Methode nach Leduc). Häufig wurden die Tiere cyanotisch infolge der behinderten Atmung. Schon bei einer Stromstärke von 1 mA war die Muskulatur tetanisch gespannt, so daß auf Schmerzreize keine Reaktion erfolgte. Der

Tod trat ein infolge eines Herzstillstandes, wenn eine Stromstärke von 2 mA 2 Minuten lang eingeschaltet war. Alle Tiere waren in ihrem Allgemeinbefinden sehr stark beeinträchtigt, wenn Stromstärken, die für eine Reaktionslosigkeit auf Schmerzreize notwendig waren, längere Zeit appliziert wurden. Eine Stromstärkeerhöhung um einige Zehntel mA konnte schon tödlich sein.

Eine besondere Methode zur Erzeugung einer Elektronarkose entwickelten v. Harreveld und Mitarbeiter (1942), welche vor allem mit einem Sinuswechselstrom arbeiteten (1934) (s. Kapitel II A 3). Bei den Versuchen an Hunden wurde eine bitemporale Elektrodenanordnung angewandt, d.h. die Elektroden waren zu beiden Seiten des Schädels hinter den Augen befestigt. In den ersten 30 Sekunden wurde zunächst eine Stromstärke von 600-750 mA eines Rechteckimpulsgleichstromes (Frequenz: 120 Hz, Impulsdauer 0,3 msec) appliziert, wobei die Tiere sofort mit gebeugten Extremitäten niederfielen. Nach einer kurzen Periode, in welcher die Beinmuskulatur weitgehend ohne Tonus war, entwickelte sich ein heftiger Spasmus der Extensoren. Die Atmung stand vollkommen still, der Puls war verlangsamt, oft kam eine Miktion und eine Defäkation vor. Nach dieser Art Elektroschock wurde die Stromstärke auf "Narkoseniveau", auf 80-125 mA, herabgesetzt. Daraufhin löste sich der Muskelspasmus und die Atmung setzte wieder ein. Zwei verschiedene Verhaltensweisen konnten in Erscheinung treten, welche als der "narkotische" und der "kinetische Typus" der Elektronarkose bezeichnet wurden. Während des "narkotischen Typus" lagen die Tiere vollkommen ruhig, außer einigen klonischen Zuckungen waren keine Bewegungen zu sehen. Der Kopf war nach dorsal flektiert; die Atmung war erschwert wegen eines Glottiskrampfes; die Pulsfrequenz war herabgesetzt. Reflexe, z.B. Corneal- und Pupillenreflex, konnten nicht ausgelöst werden; es bestand eine Analgesie. Dieser Zustand konnte mehrere Stunden aufrechterhalten werden. Wenn der Stromkreis geöffnet wurde, erholten sich die Hunde innerhalb von wenigen Minuten, wobei sie ein kataleptisches Stadium durchliefen. Oft aber entwickelte sich der "kinetische Typus", welcher dadurch charakterisiert war, daß die Hunde häufig versuchten, sich aufzurichten, heftig den

Kopf und die Extremitäten bewegten und dabei bellten und winselten. Puls und Atemfrequenz waren erhöht. Die Analgesie war keine vollständige. Unmittelbar nach Abschalten des Stromes erholten sich die Tiere ohne kataleptische Symptome; für kurze Zeit waren sie etwas erregt. Häufig kamen diese beiden beschriebenen Typen der Elektronarkose gemischt vor.

Ross und Allen (1943) verwendeten Rechteckimpulsströme mit einem Verhältnis von Impulsdauer zur Periodendauer von 50 % bei Frequenzen zwischen 80 und 470 Hz. Um bei Hunden einen Narkosezustand hervorzurufen, mußten Stromstärken von 2-10 mA bei Spannungen bis zu 17 Volt über eine Kopfkathode und eine Anode über der Lumbalregion zugeführt werden. Auch diese Forscher hielten Leducs Berichte für zu optimistisch, da Erregungserscheinungen, Muskelspastizität und eine erschwerte Atmung unumgänglich waren. Während der Elektronarkose hielten die Tiere die Augen offen, welche starr fixiert waren. Die Reflexe, z. B. auch der Cornealreflex waren nicht auslösbar.

Bevor sich Giljarowski und Mitarbeiter (1956) dem nahe verwandten Gebiet des Elektroschlafes zuwandten, führten sie Elektronarkoseversuche mit Rechteckimpulsströmen (Frequenz: 100 Hz; Impulszeit: 2-5 msec; Elektrodenanordnung: Augen-Nacken) durch. Es wurde auf Komplikationen hingewiesen, die vor allem in einer "hyperkinetischen" Reaktion, d.h. einem beträchtlichen Reizzustand der behandelten Patienten (Schizophrenen) und in unangenehmen Empfinden bestanden.

b. Mit einem einweggleichgerichteten (Frequenz 50 Hz) oder zweiweggleichgerichteten (Frequenz 100 Hz) Sinuswechselstrom durchströmte Scheminzky (1938) Frösche im Wasserbecken mit einer Stromdichte von 0,1-0,03 mA/qmm Wasser. Die Tiere waren während der gesamten Durchströmungszeit (bis zu 15 min.) wegen der allgemeinen Muskelkrämpfe unbeweglich und konnten nicht auf Schmerzreize reagieren.

c. Logarithmisch ansteigende Stromimpulse

Eine vom leducschen Strom etwas verschiedene Stromform versuchte Rose und Rabinov (1945). Die Stromimpulse stiegen logarithmisch an, blieben auf ihrem Maximum für 0,8-1,3 msec und fielen dann senkrecht auf Null ab. Frequenzen von 100-120 Hz wurden verwendet. Die Elektroden waren über der Frontal-und Sakralregion befestigt. Auch bei diesen Versuchen stellten sich starke Muskelkontraktionen und erschwerte Atmungsbewegungen ein. Der Corneal-und Pupillenreflex waren abwesend. Die Versuche an Ratten, Kaninchen, Katzen und Affen führten die Forscher zu der Annahme, daß die Elektronarkose der chemischen Narkose um so ähnlicher sei, auf einer je höheren Stufe innerhalb der phylogenetischen Reihe die Tiere standen.

d. Dreiecksimpulse

Poznak (1963) hatte mit dreieckigen Stromimpulsen (Frequenz 1-10 000 Hz) auch keine besonderen Erfolge. Zwar war die Reaktion für Hautreize stark vermindert, doch war es nicht möglich Salivation, Laryngospasmus, Herzarrhytmien,Zyanose und Muskelzittern zu vermeiden. Den Versuchstieren (Hunden) wurdendie Elektroden an Stirn und Occiput aufgelegt.

Tabelle 3: Übersicht über die Elektronarkoseversuche mit unterbrochenem Gleichstrom

a. Reckteckimpulsstrom

Untersucher	Parameter der Stromform	Elektrodenanordnung	Versuchstier	Stromstärke	Erfolg
Leduc (1902)	Frequenz:100Hz Impulsdauer: 1 msec	Kathode an Stirn, Anode an Lendenwirbelsäule	Hunde Kaninchen	3-4 mA	Sanftes Einschlafen, ohne Abwehrbewegungen. Chloroformähnlicher Zustand mit vollkommener Anästhesie.
Engelen (1912)	Leduc-Strom	Durchströmung im Wasser	Fische		Die Tiere liegen wie in chemischer Narkose auf der Seite. Tiefe Narkose.
Tschagowetz (1912)	Leduc-Strom	wie bei Leduc	Katzen	zuerst 15-20mA dann 5-10 mA	Zuerst allgemeiner Tetanus, dann schlafähnlicher Zustand, doch ohne Analgesie. Reflexe verstärkt. Erst nach langer Durchströmung Schmerzempfindlichkeit herabgesetzt.

Untersucher	Parameter der Stromform	Elektroden-anordnung	Versuchstier	Strom-stärke	Erfolg
v.Neergard (1922)	Leducstrom	wie bei Leduc	Kaninchen Katzen Hunde	1,3 mA 1,7 mA 3-6 mA	Sehr heftiges Excitationsstadium mit starken Muskelkrämpfen. Niemals völlige Erschlaffung der Muskulatur. Preßatmung. Nicht immer vollständige Analgesie
Ivy, Barry (1932)	Leducstrom	Kathode im Nacken, Anode an Lumbal-wirbelsäule	Hunde	4-12 Volt	Schmerzunempfindlichkeit bei Erhaltung des Bewußtseins. Allgemeine Muskelrigidität.
Stief (1933)	Frequenz:133Hz Impulsdauer 3-8msec	wie bei Leduc	Hunde	20-30 mA	Anästhesiezustand mit teilweiser Muskelrelaxation. Häufig tonisch-klonische Krämpfe, Katalepsie, Salivation, Defäkation, Urination, Erhöhte Atemfrequenz.
Sack, Koch (1933)	Leducstrom	wie bei Leduc	Kaninchen	bis 2 mA	Bei Stromzufuhr Schreien, Wimmern. Behinderte Atmung. Tetanisch gespannte Muskulatur, deswegen keine Reaktion auf Schmerzreize.

Untersucher	Parameter der Stromform	Elektroden-anordnung	Versuchs-objekte	Strom-stärke	Erfolg
v.Harreveld (1942)	Frequenz:120Hz Impulsdauer: 0,3 msec	bitemporal	Hunde	zuerst 600 - 750 mA (30 msec lang) dann 80-125mA	Zuerst elektroschockartige Erscheinungen mit Atemstill-stand. Dann Unruhe, klonische Zuckungen, Dorsalflexion des Kopfes, erschwerte Atmung. Manche Hunde zeigen immer heftige Muskelbewegungen. Analgesie.
Ross,Allen (1943)	Frequenz:80-470 Hz Ver-hältnis Im-pulsdauer zu Pause: 1:1	Kathode an Kopf, Anode über Lumbal-region	Hunde	2-10 mA	Analgesiestadium unter Er-regungserscheinungen, Muskel-spastizität, erschwerte Atmung.
Giljarowski (1956)	Frequenz:100Hz Impulsdauer: 2 - 5 msec	Augen - Nacken	Schizophre-ne Patien-ten		Beträchtlicher Reizzustand. Unangenehme Empfindungen.

b. Gleichgerichteter Sinuswechselstrom:

Untersucher	Parameter der Stromform	Elektroden-anordnung	Versuchstier	Strom-stärke	Erfolg
Scheminzky (1938)	Einweggleichr. Frequenz:50Hz Zweiweggleich. Frequenz:100Hz	Durchströmung im Wasser	Frosch	0,1-0,03 mA/qmm Wasser	Muskelkrämpfe. Wegen starkem Tetanus scheinbare Analgesie.

c. Logarithmisch ansteigende senkrecht abfallende Stromimpulse:

Rose,Rabinov (1945)	Frequenz:100-120Hz Impuls-breite am Maximum:0,8-1,3 msec	Stirn-Sakralregion	Ratten Kaninchen Katzen Affen		Starke Muskelkontraktionen und erschwerte Atmung. Bei Affen der chemischen Narkose ähnlicher.

d. Dreiecksimpulsströme:

v.Poznak (1963)	Frequenz: 1-10000 Hz	Stirn-Nacken	Hund		Muskelzittern, Laryngospasmus, Herzarrythmien, Zyanose. Stark verminderte Reaktion auf Hautreize.

3. Der sinusoidale Wechselstrom

Eine der gebräuchlichsten Stromarten zur Erzeugung einer Elektronarkose war der Sinuswechselstrom.

Ein Wechselstrom mit einer Frequenz von 50 Hz diente Scheminzky (1924,1933) zur Durchströmung von Fischen in einem Wasserbecken. Nach einer sehr heftigen Erregung stellten sich die Tiere mit ihrer Körperachse quer zu den Feldlinien ein, ein Verhalten wofür der Terminus "Oscillotaxis" gebraucht wurde. (Bei Salmo lacustris ist eine Stromdichte für die Oscillotaxis von 4,12 mA/qmm notwendig) Bei höheren Stromdichten gaben die Fische die Ausrichtung im Wechselstromfeld auf und legten sich auf die Seite. In diesem Stadium bestand eine Analgesie. (Salmo lacustris bei 8,93 mA/qmm)

Nicolai (1930) konnte diese Ergebnisse bestätigen. Nach einer 30 Minuten dauernden Durchströmung von Fischen mit einer Stromdichte, welche für ein Analgesiestadium erforderlich war, waren keine Schädigungen aufzudecken gewesen.

Besser und anschaulicher zur Charakterisierung der Stromintensität bei einer Durchströmung im Wasserbecken ist der von Holzer (1932) eingeführte Begriff der "Gestaltspannung"; sie ist definiert als die zwischen Schnauzenspitze und Schwanzende gelegene Spannung, welche nach Holzer für alle Tiere einer Art unabhängig von der Länge konstant ist. Für Fische, wie Leuciscus rutilis, Carassius vulgaris und Alburnus lucidus liegt sie bei 1,4 Volt (effektiv). Ein Wechselstrom von 50 Hz wurde für diese Untersuchungen benutzt.

Harreveld (1934) entwickelte eine eigene Methode der Elektronarkose, welche als eine Kombination von elektrischer Dauerdurchströmung mit einem Elektroschock angesehen werden kann. Hunden wurde über eine bitemporale Elektrodenlokalisation in den ersten 30 Sekunden eine Stromstärke von 200-300 mA eines 50 Hz-frequenten Sinuswechselstromes appliziert. Danach wurde

die Stromstärke verringert und mit 30-100 mA ein Narkosezustand für mehrere Stunden aufrecht erhalten. Das Verhalten der Tiere war in etwa durch die gleichen Symptome charakterisiert, wie sie oben bei den Versuchen von v. Harreveld mit Rechteckimpulsströmen beschrieben worden sind (Kapitel: II.A.2).

Knutson (1954,1956) prüfte einen Sinuswechselstrom mit einer Frequenz von 700 Hz auf die Eignung hin, eine Narkose zu erzeugen. Als Versuchstiere wurden Hunde verwendet. Die Elektroden waren auf dem Kopf fixiert, wobei eine genaue Lokalisation nicht angegeben wurde. Wenn die Stromstärke auf die zur Erzeugung einer Narkose notwendigen Dosis, auf etwa 50-100 mA, gebracht wurde, gerieten die Tiere in einen starken Extensionsspasmus und in tonische Konvulsionen, wobei eine Asphyxie bestand. Bei langsamer Steigerung der Stromstärke entwickelten sich diese Symptome allmählich. Außerdem benötigte man bei der verzögerten Stromapplikation eine für die Narkose höhere Stromdosis, da durch die länger andauernden Bewegungen der Tiere der Elektrodenkontakt verschlechtert worden war. Der Narkosezustand war gekennzeichnet durch eine geringe Muskelrigidität und eine langsame und regelmäßige Atmung. Die Augen wurden geschlossen gehalten und bewegten sich nicht willkürlich. Der Puls war verlangsamt und unregelmäßig. Die Zunge war zyanotisch. Häufig kam Salivation, Miktion und Defäkation vor. Obwohl schmerzhafte Reize zu keiner Reaktion führten, konnte der Wunsch nach einer idealen Narkose wegen der unangenehmen Nebenerscheinungen in keiner Weise befriedigt werden. Deswegen nahm Knutson eine Reihe von Mitteln zu Hilfe, die auch bei der gebräuchlichen chemischen Narkose verwendet werden: Die Sauerstoffversorgung wurde verbessert durch eine endotracheale Intubation, die unter dem Einfluß von Muskelrelaxantien (D-Tubocurarinchlorid, 1 mg/10 kg Körpergewicht i.v. oder Flaxedil) wegen des anhaltenden Masseterspasmuses durchgeführt werden mußte. Die Bradycardie und Herzarrythmie wurde behoben durch Gaben von Atropinsulfat (0,006 mg/kg Körpergewicht, i.v. 15 Minuten vor Beginn der Elektronarkose). Außerdem verhinderte das Atropin die excessive Speichelproduk-

tion. Die initialen tonischen Convulsionen konnten durch Barbituratgaben (Pentobarbital-Na 10 mg/kg) nicht vermieden werden.

Eine Gruppe von Forschern aus dem Medical Center in Mississippi, Hardy, Fabian, McNeil und Turner setzten die Untersuchungen von Knutson fort. Eingehend wurde die Physiologie von Hunden studiert (1958,1961), welchen Stromstärken von 35-50 mA (Spannung bis zu 60 Volt) eines Sinuswechselstromes von 700 Hz über eine bitemporale Elektrodenanordnung appliziert wurden, wobei außer der endotrachealen Intubation unter Curarewirkung und Atropingaben, wie sie Knutson zu Hilfe genommen hatte, während der gesamten Elektronarkosedauer soviel Muskelrelaxantien zugeführt wurden, daß die Atmung gerade noch spontan erfolgte. Auf anderem Wege konnten die starken tonischen Muskelkontraktionen nicht vermieden werden. Nach Elektronarkosen bis zu einer Dauer von 8 Stunden kehrten die Tiere unmittelbar zu ihrer normalen Aktivität zurück. Über die zahlreichen Versuche an Menschen soll in einem späteren Kapitel berichtet werden, wie auch über die Experimente von Price und Dornette (1961).

Auch Herin (1963) benützte den 700 Hz-Sinuswechselstrom. Chemisch wurde die Elektronarkose unterstützt durch eine Vorbehandlung mit Atropinsulfat (0,07 mg/kg) und Morphinsulfat (4-8 mg/kg), damit die endotracheale Intubation und die Elektrodenplazierung in Ruhe durchgeführt werden konnten. Mit Stromstärken von 25-50 mA bei Spannungen zwischen 8 und 15 Volt konnte eine Anästhesie erzielt werden. Um allzu heftige Muskelspasmen zu vermeiden, wurde der Strom langsam induziert. Die für große Operationen (Labarotomie, Thorakotomie, Gefäßanastomosen) notwendige Muskelrelaxation wurde durch Gaben von Curare erreicht (Intocastrin 0,6-1,1 Einheiten/kg, alle 15-20 Minuten). Das Verschwinden des Pupillenreflexes konnte nach Herin (1964) als zuverläßlicher Indikator für die eingetretene Bewußtlosigkeit verwendet werden.

Short (1964) probierte die Elektronarkose mit einem 700 Hz-Sinuswechselstrom an verschiedenen Säugetieren aus. Nadelelektroden - die eine frontal zwischen den Augen, die andere hinter der Crista occipitalis - wurden bis zum Schädelknochen eingestochen. 450 kg schwere Rinder brauchten für ein Anästhesiestadium bei einer Vorbehandlung mit Propriopromazin (0,22 mg/kg) Stromstärken von 55-65 mA, ohne Prämedikation 5-15 mA mehr. Ausgewachsene Schafe benötigten 25-30 mA bei einer geeigneten Elektrodenlokalisation; wenn die Elektroden nur subcutan saßen, waren bis zu 85 mA notwendig. 100 bis 250 kg schwere Pferde konnten mit 20-40 mA bei guter Muskelrelaxation anästhesiert werden. Bei Schweinen differierten die Narkosestromstärken ganz erheblich. In einem Zeitraum von 5 Minuten wurde die erwünschte Stromdosis eingestellt, wobei besonders auf die Atmung acht gegeben wurde. Alle Tiere erholten sich schnell und konnten innerhalb von 3-5 Minuten wieder laufen. Ein signifikanter Temperaturanstieg wurde nicht festgestellt, wobei die Tiere (Kühe) jedoch mit einem Ataraktikum vorbehandelt worden waren (Short 1965).

Auch Zichel (1965) lehnte sich bei seinen Versuchen an die Methodik der Arbeitsgruppe um Hardy und Fabian an. An Hunden, bei welchen die Elektroden bitemporal und fronto-occipital angeordnet waren, wurden die Experimente durchgeführt. Ohne Prämedikation gelangen nur in 4 von 40 Experimenten annähernd optimale Narkosebedingungen. Nach einem initialen Erregungszustand, der sich in Krämpfen der Gesichts-, Hals-, und Extremitätenmuskulatur äußerte, legten die Tiere bei konstant gehaltener Spannung den Kopf zur Seite. Eine Lageveränderung der Extremitäten war trotz der stark tonisierten Muskulatur möglich. Die Atmung war meist verkrampft. Auf Anruf hin bemühten sich die Hunde mit den Augen zu folgen. Schmerzhafte Stiche, z.B. in das Peritoneum oder das Periost, führten bei einem Teil der Tiere zu keiner Reaktion, andere wieder hatten keine merklich herabgesetzte Sensibilität. Wenn der Stromkreis plötzlich geschlossen wurde, kam es zu allgemeinen Verkrampfungen der Muskulatur wie bei einem Elektroschock, zu spontaner Miktion und Defäkation und zu heftigen Abwehrbewegungen. Nicht selten

fehlten diese Erscheinungen, wenn eine Elektronarkose am gleichen Tier wiederholt wurde. Allmähliches stufenloses Höherschalten der Spannung erwies sich als vorteilhafter als der abrupte Stromschluß. Ein Teil der Tiere zeigten nach einer 1-stündigen Elektronarkose mit 30 Volt starke Erschlöpfungserscheinungen und eine beträchtliche psychische Erregung, die länger als 12 Stunden andauern konnte.

Tabelle 4: Übersicht über die Elektronarkoseversuche mit Sinuswechselstrom

Untersucher	Frequenz	Elektroden-anordnung	Versuchs-tier	Stromstärke	Erfolg
Scheminzky (1924,1933)	50 Hz	Durchströ-mung im Wasser	Fische z.B.Salmo lacustris	8,93 mA/mm^2	Bei niederen Stromstärken heftige Erregung. Körperachse quer zu den Feldlinien. Bei höheren Stromstärken Seitenlage bei gespannter Muskulatur.Analgesie.
Harreveld (1934)	50 Hz (30-8000 Hz)	bitemporal	Hunde	für die ersten 30 sec 200-300 dann 30-100 mA	Zuerst elektroschockartige Erscheinungen. Dann Unruhe, klonische Zuckungen. Dorsalflexion des Kopfes. Atembeschwerden. Analgesie.
Knutson (1954,1956)	700 Hz bis 1500 Hz	auf dem Kopf	Hunde	50-100 mA	Bei Einleitung Extensionspasmus. Tonische Konvulsionen.Asphyxie. Dann Muskelrigidität, Laryngospasmus, Zyanose. Puls langsam, unregelmäßig. Analgesie.

Untersucher	Frequenz	Elektroden-anordnung	Versuchs-tier	Stromstärke	Erfolg
Hardy,Fabian (1958,1961)	700 Hz	bitemporal	Hunde	35-50 mA bis 60 V	Endotracheale Intubation unter Curare. Während Narkose Muskelrelaxantien, weil sonst starke Muskelkontraktionen nicht vermieden werden konnten. Analgesie.
Herin (1963)	700 Hz	bitemporal	Hunde	25-50 mA 8-15 V	Endotracheale Intubation mit Atropin, Morphium. Bei großen Operationen Verabreichung von Muskelrelaxantien. Analgesie.
Short (1964)	700 Hz	froto-occipital (Nadelelektroden)	Rinder Schafe Pferde	55-65 mA 25-30 mA 20-40 mA	Gutes Anästhesiestadium mit Muskelrelaxantien. Häufig wurde Proprio-promazin verwendet. Analgesie.
Zichel (1965)	700 Hz	bitemporal, fronto-occipital	Hunde	30 V	Nur in 4 von 40 Versuchen optimale Narkosebedingungen. Krämpfe der Gesichts-,Hals und Extremitäten-muskulatur. Stark tonisierte Muskulatur. Atmung verkrampft. Nicht bei allen Tieren vollkommene Analgesie.

4. Kombinierte Ströme

a. Gleichstrom plus Sinuswechselstrom

Nicolai (1930) durchströmte Fische mit einem von einem Sinuswechselstrom überlagerten Gleichstrom in einem Wasserbassin. Die Frequenz des Wechselstromes betrug 50 Hz. Verwandelte die Wechselstromkomponente den Gleichstrom nur in einen schwach pulsierenden, so verhielten sich die Fische, unabhängig von der Frequenz der Pulsationen, ähnlich wie in einem kontinuierlichem Gleichstromfeld. Mit zunehmender Wechselstromkomponente traten Übergänge zwischen den durch kontinuierlichen und unterbrochenen Gleichstrom bedingten Zustandsbildern auf. Dominierte schließlich der Wechselstromanteil gegenüber dem Gleichstrom, so wurden Verhaltensweisen ausgelöst, die denen durch reinen Wechselstrom hervorgerufenen weitgehend identisch waren.

b. Gleichstrom plus Rechteckimpuls (- wechsel -) strom.

Als Anan'ev (1957;1960 ins Englische übersetzt), der sich zunächst mit dem Elektroschlaf befaßte, von einer besonderen Elektronarkosetechnik, mit welcher er Hunde erfolgreich narkotisierte, berichtete, glaubte man, daß nun endlich ein Durchbruch zu einer idealen Elektronarkose gelungen sei. Anan'ev überlagerte einen Gleichstromgrundpegel (über dessen Größe keine Angaben vorliegen) mit einem Reckteckimpulsstrom mit einer Frequenz von 100 Hz und einer Impulsdauer von 1-1,4 msec. Den Hunden wurde eine Kathode auf die Augen und eine Anode über dem Occiput aufgelegt. Bei den initialen Stromstärken von etwa 0,6-0,9 mA fielen die Hunde in einen Schlaf ("Elektroschlaf"); diese Schlafperiode wurde auf etwa 10-15 Minuten ausgedehnt. Eine anschließende Stromstärkesteigerung auf 4-5 mA innerhalb der folgenden 20 Minuten hatte eine "diffuse Schlafhemmung", eine Excitationsphase, die nur sehr geringgradig ausgeprägt war, zur Folge. Bei Stromstärken von 6-7 mA konnten schon Operationen an der Haut und an den oberflächlichen Muskeln durchgeführt werden. In tiefer Narkose befanden sich die

Tiere bei Stromstärken von 9-12 mA (Spannung: 35-40 Volt). Es waren Operationen wie Laparotomie, Amputationen und Transplantationen von Extremitäten bei einer Relaxation der Körpermuskulatur und unter vollkommener Analgesie möglich. Mit dieser Technik wurden niemals ein Atemstillstand, Konvulsionen oder stärkere Bewegungen beobachtet. Nach Öffnung des Stromkreises waren die Tiere sofort wach, wobei noch für die nächsten 10 bis 30 Minuten die Gewebeanästhesie erhalten geblieben war.

Doch schon bald wurde der anfängliche Enthusiasmus wieder gedämpft. Eine Arbeitsgruppe, welche sich um R. Smith gruppierte am Medical College in Georgia, nahmen die Nachuntersuchungen der Versuche von Anan'ev auf und analysierten kritisch dessen Erfolge. Smith (1961-1965) benützte einen mit einem Gleichstrom kombinierten Rechteckimpulswechselstrom (Frequenz: 100 Hz; Impulsdauer: 1 oder 2 sec). Drei verschiedene Elektrodenlokalisationen wurden ausprobiert: 1. Anode zwischen den Augen-Kathode hinter der protuberantia occipitalis. 2. Anode zwischen den Augen-Kathode im Rectum. 3. Anode auf dem Scheitel-Kathode am Mundhöhlendach. Die Narkose wurde eingeleitet, in dem zuerst ein Gleichstrom von 20 mA entweder in kurzer Zeit (innerhalb einer Sekunde) oder in Schritten von 3 mA/min. verabreicht und dann der Impulsstrom mit einer Geschwindigkeit von 1 mA/5-15 sec - eine Apnoe sollte auf jeden Fall vermieden werden - solange gesteigert wurde, bis eine völlige Anästhesie eintrat. Mittels eines Motorpotentiometers wurde eine glatte Stromzufuhr gewährleistet, so daß die anfänglichen Nebenerscheinungen, die in einer verstärkten Muskelaktivität bestanden, vermindert werden konnten. Doch jedesmal zeigten sich bei der initialen Stromzufuhr Unruheerscheinungen. Die Anästhesie stellte sich zuerst an der Haut, dann an den Augen und an der Nase ein. Das Analgesiestadium konnte am besten dadurch geprüft werden, wenn mittels einer Tuchklemme die Schwanzspitze stark und 30 Sekunden lang gezwickt wurde. Bei einem negativen Ausfall dieses Testes konnten eingreifende Operationen durchgeführt werden. In diesem Zustand reagierten noch manche Tiere auf Anruf (siehe auch bei

Robinowitsch, v. Neergard u. Zichel). Die Muskelrelaxation war mäßig, aber nicht optimal. Häufig wurde ein Temperaturanstieg um 1°C, manchmal sogar bis zu 42°C gemessen, da durch eine endotracheale Intubation oder infolge einer zu starken Kontraktion der Nackenmuskulatur die Luft nicht über die Zunge streichen konnte und somit bei Hunden die wesentlichste Wärmeabgabe beträchtlich eingeschränkt war. Die Temperaturerhöhung wurde durch die verstärkte Muskelaktivität bewirkt und konnte durch Gaben von Gallamin beseitigt werden (Gowing 1964). Hunde benötigten für ein Narkosestadium 20-30 mA Gleichstrom und 5-45 mA Rechteckwechselstrom. Bei den daraus resultierenden Gesamtstromstärken von 25 bis 75 mA und einem Widerstand des Hundeschädels von etwa 400 Ohm ergaben sich Spannungen von 10 bis 30 Volt. Die Schädeldecke hatte keinen Einfluß auf die erforderliche Stromstärke - ein Befund, der auch von Herin (1964) erhoben wurde. Kaninchen konnten bei 15 mA Gleichstrom und 1-2 mA Rechteckimpulsstrom operiert werden. Katzen brauchten dafür 15 mA Gleichstrom und 1-4 mA Impulsstrom, Rhesusaffen und Schimpansen 20 mA Gleichstrom und 10-20 mA Rechteckstrom. In einer neueren Versuchsreihe von Smith stellte sich heraus, daß Affen als Besonderheit ihrer Spezies auf jede Stromapplikation nach tiefster Inspiration den Atem anhielten unter einem Preßdruck bei geschlossenen Atemöffnungen (Mund, Nasenlöcher), woraus sich eine Zyanose, Bradykardie und ein Extensionsspasmus resultierte - ein Verhalten, das dem bei einem Valsalvaschen Versuch sehr ähnlich ist. Die postnarkotische Phase war gekennzeichnet durch ein langsames Erwachen, starke Müdigkeit und allgemeine Konvulsionen. Eine nasotracheale Intubation beseitigte diese Abnormalitäten. (Bei Affen hat sich nach Smith für eine Elektronarkose ein Sinuswechselstrom vom 300-3000 Hz als am günstigsten erwiesen). Nach einer 6-stündigen Elektronarkose erwachten die anderen Tiere sofort und verhielten sich normal oder zeigten höchstens Ermüdungssymptome. Es wurde auch eine postelektronarkotische Analgesie bis zu einer Stunde Dauer festgestellt. Psychische Alterationen waren nicht aufgetreten. Das Gedächtnis wurde offensichtlich nicht beeinträchtigt, da die Hunde ihre vorher angelernten Künststücke ganz normal ausführten.

Sances, Larson und Jakobs (1963,64,65) narkotisierte mit dieser aus Gleichstrom und Rechteckimpulswechselstrom gemixten Stromart Hunde und Rhesusaffen. Die Elektroden wurden auf dem Nasenrücken und über der Protuberantia occipitalis befestigt. Anaesthetika waren nicht notwendig, wurden aber zu Hilfe genommen, um die Stimulation der peripheren Nerven während der Einleitung zu unterdrücken. Hunde benötigten 6 mA Gleichstrom plus 8 mA Rechteckimpulswechselstrom (Frequenz: 100 Hz, Impulsdauer: 2,5 msec), Affen 5 mA Gleichstrom plus 3-7 mA Impulsstrom.

Mit einer besonderen Einleitungstechnik erzielte McIntyre (1964) gute Ergebnisse. Die Hunde wurden zunächst nach einer intravenösen Gabe von Thiopenton (15 mg/kg) endotracheal intubiert, geeignet gelagert und die Elektroden - die Kathode auf dem Scheitel, die Anode am Mundhöhlendach - angelegt. Dann wurde nach einer plötzlichen Gleichstromzufuhr von 20 mA ein Rechteckimpulswechselstrom (Frequenz: 200 Hz; Impulsdauer: 2 msec) innerhalb von 2 Minuten auf 9 mA (Spitzenstromstärke: 40 mA) gesteigert. Anschließend wurde innerhalb von 3 Minuten die Frequenz und die Impulsdauer verringert, zugleich die Stromstärke des Impulsstromes kontinuierlich erhöht, um den durch Frequenz- und Impulsdauerverminderung bedingten Stromstärkeabfall auszugleichen. Auf diese Weise kam man schließlich zu einer Frequenz von 100-125 Hz und einer Impulsdauer von 1 - 1,5 msec. Die erreichten Stromstärken lagen bei 12-13 mA (Spitzenstromstärken: 60 - 90 mA). Diese Induktionstechnik hatte den Vorteil, daß mit der höheren Frequenz relativ schnell ohne Respirationsbeschwerden die Stromstärke appliziert werden konnte. Da eine für chirurgische Zwecke notwendige Narkosetiefe mit einer Frequenz von 200 Hz nicht voll erreicht werden konnte, mußte die Frequenz und die Impulsdauer wieder erniedrigt werden. Die Tiere atmeten während des Narkosestadiums unter Anstrengung. Wenn endotracheal intubiert wurde, stieg die Körpertemperatur um 1-2°C. Die Extremitätenmuskulatur war relaxiert, des öfteren aber waren die Vorderbeine auch spastisch. An Zunge, Nacken und im Gesicht bestanden ständig fibrilläre Muskelzuckungen.

In einer neueren Arbeit berichtete McIntyre (1965) von weiteren Versuchen an Hunden. Die Kathode saß am Scheitel, bzw. am Occiput, die Anode am harten Gaumen, bzw. zwischen den Augen. Da ein hoher (20 mA) Gleichstromanteil nicht als vorteilhaft erschien, wurden die Experimente mit einem Gleichstrom von 5 mA durchgeführt. Mit einer Geschwindigkeit von 5-10 mA/min wurde der Strom ohne Stockungen und Unterbrechungen eingeschlichen. Rechteckimpulsströme mit verschiedenen Parametern (Frequenz: 100 Hz, Impulsdauer: 1msec; Stromstärke: bis 135 mA. 100 Hz, 2 msec, 37 mA. 200 Hz, 2 msec, 50 mA; 200 Hz, 1 msec, 42 mA.) wurden geprüft. Als Ergebnis wurde gefunden, daß diese Stromarten die Tiere beruhigen und relaxieren konnten, doch eine Analgesie konnte niemals erreicht werden. Ein Anstieg der Stromstärke hatte eine muskuläre Spastizität zur Folge, die die Reaktion auf Schmerzreize überdeckte.

Klemm (1964) beschrieb das Verhalten von Katzen während einer Elektronarkose. Als Elektroden wurde Palladiumdraht verwendet, welcher unter die Haut implantiert worden war. Die Kathode saß über der Protuberantia occipitalis, die Anode zwischen den Augen auf dem Nasenknochen. Dem Rechteckimpulswechselstrom wurde soviel Gleichstrom beigemischt, daß auf jeden Fall kein negativer Stromanteil mehr vorhanden war. Die Einleitung geschah so schnell wie möglich, ohne einen Atmungsstillstand zu erzeugen. Folgende Stadien wurden beschrieben:

Stadium I,0-4 mA: Zuckungen der Augenmuskulatur, Steigerung bis zum Tetanus. Tonische Kontraktur einiger Gesichtsmuskeln.
Stadium II, 4-7 mA: tonische Kontraktion der gesamten Gesichtsmuskulatur, zurückgezogene Commissura labiorum, Beginn der Regidität der dorsalen Cervikalmuskeln. Niesen konnte durch Verschiebung der Anode in Richtung zum Scheitel vermindert werden.
Stadium III, 7-10 mA: Rigidität der Cervicalmuskeln. Fehlender Cornealreflex.
Anaesthesiestadium, 15-18 mA: Verengung der Pupillen zu vertikalen Schlitzen, keine Reaktion auf Lichteinfall. Die Analgesie wurde an den Augen, den Weichen und am Schwanz geprüft. Bei 10

Laparotomien waren in drei Fällen Zeichen von Schmerzen zu beobachten. An den Elektroden waren Verbrennungen eingetreten. Klemm konnte die Beobachtung von Smith bestätigen, daß eine vorausgehende Elektronarkose die nachfolgende insofern beeinflußt, als die Einleitungserscheinungen bezüglich der Dauer und der Intensität geringer wurden.

c. Gleichstrom plus Breitbandrauschen

In jüngster Zeit wurde von Schuy, Wageneder, Genser (1965) und Wageneder, Schuy (1966) ein neues unperiodisches Verfahren entwickelt. Der Wechselstromanteil bestand aus einem Breitbandrauschen mit frequenzunabhängiger Leistungsdichte und einem Frequenzbereich zwischen 0 und 50 KHz. Hinzu wurde eine regulierbare Gleichspannung gegeben. An Hunden und Kaninchen, denen die Elektroden an Stirn und Nacken montiert waren, wurde diese Methode ausprobiert. Barbiturate wurden nicht, jedoch geringe Mengen Muskelrelaxans (Reorganin) gegeben. Dieses Verfahren hatte gegenüber denen mit Impulsströmen den Vorteil, daß kein Laryngospasmus auftrat, eine wesentlich bessere Muskelrelaxation erreicht wurde und Blutdruck und Puls annähernd unverändert blieben.

d. Rechteckimpulsströme plus Breitbandrauschen.

Auch McIntyre (1965) untersuchte ein breites Frequenzspektrum bis zu 20 KHz oder 500 KHz auf eine Eignung für eine Elektronarkose hin. (Versuchstiere: Hunde; Elektrodenanordnung: Kathode am Scheitel, bzw. am Occiput, Anode am harten Gaumen, bzw. zwischen den Augen). Wurde dieses Frequenzrauschen, (Stromstärke bis 33 mA) mit einem Rechteckimpulsstrom von 100 Hz, 2 msec Impulsdauer oder 200 Hz und 1 msec Impulsdauer kombiniert, konnte kein ruhiger Zustand der Tiere hervorgerufen werden. Wurde der periodische Impulsstromanteil weggelassen, konnten die Versuchstiere beruhigt werden; doch ein lautes Geräusch hob diesen Zustand wieder auf. Die Beine waren relaxiert. Doch in keinem Fall wurde eine Analgesie beobachtet. Höhere Stromstärken erzeugten nur Muskelspasmen.

Tabelle 5: Übersicht über die Elektronarkoseversuche mit kombinierten Strömen

b. Gleichstrom plus Rechteckimpulsstrom:

Untersucher	Parameter der Stromform	Elektroden-anordnung	Versuchs-tier	Stromstärke	Erfolg
Anan'ev (1957)	Frequenz:100 Hz Impuls-dauer: 1-1,4 msec	Augen - Occiput	Hunde	7-13 mA 35-40 V gesamt	Zuerst Schlaf. Dann geringes Excitationsstadium. Dann Narkose, Muskelrelaxation. Keine Atembeschwerden, keine Konvulsionen.
Smith (1961-1965)	Frequenz:100 Hz Impuls-dauer 1 oder 2msec Frequenz: 500-700 Hz Impulsdauer: 0,1-0,2 msec	Augen-Occiput, Augen-Rectum, Scheitel-Gaumen	Hunde Kaninchen Katzen Affen	20mA Gleich. 25-75mA Imp. 10-30 V 15 mA Gleich. 1-2mA Impuls. 15mA Gleich. 1-4mA Impuls. 20mA Gleich. 12-30mA Imp.	Bei initialer Stromzufuhr erhöhte Muskelaktivität, Unruheerscheinungen. Dann ruhige Lage, mäßige bis gute Muskelrelaxation. Gute Analgesie. Bei Affen Atemstillstand in tiefer Inspiration, Auspressen der Luft bei geschlossenen Atemöffnungen. Es entwickeln sich Zyanose, Bradycardie, Extensionsspasmus.

Untersucher	Parameter der Stromform	Elektroden-anordnung	Versuchs-tier	Stromstärke	Erfolg
Sances, Larson, (1963-1965)	Frequenz:100 Hz Impuls-dauer 2,5msec	Nasenrücken-Occiput	Hunde Affen	6mA Gleich. 8mA Impuls. 5mA Gleich. 3-7mA Impuls.	Nur während initialer Strom-zufuhr Excitation. Analgesie.
Mc Intyre (1964) (1965)	Frequenz: 100,200 Hz Impulsdauer 1-2 msec	Augen-Occiput, Scheitel-Gaumen	Hunde	20mA Gleich. 12-13mA Imp. 5mA Gleich. 35-135mA Imp.	Atembeschwerden. Fibrationen im Gesicht und Nacken. Muskel-spasmen, Tremor. In neueren Versuchen keine Analgesie.
Klemm (1964)	Frequenz:66, 100,700 Hz Impulsdauer: 0,7;0,8;1; 2; 3; msec	Augen-Occiput	Katzen	16-23mA ge-samt je nach Frequenz und Impulsdauer	Tonische Kontrakturen der Ge-sichtsmuskulatur. Rigidität der Nackenmuskulatur. Nicht immer vollständige Analgesie.

a. Gleichstrom plus Sinuswechselstrom:

Untersucher	Parameter der Stromform	Elektroden-anordnung	Versuchs-tier	Stromstärke	Erfolg
Nicolai (1930)	Frequenz: 100 Hz	Durchströ-mung im Wasser	Fische		Wenn Anteil des Sinuswechsel-stromes klein, Verhalten wie bei Gleichstrom. Bei großem Wechselstromanteil, Verhalten wie bei reinem Wechselstromfluß.

c. Gleichstrom plus Breitbandrauschen:

Wageneder, Schuy, Genser (1965, 1966)	Frequenzbe-reich: 0-50 KHz	Stirn-Nacken	Hunde Kaninchen		Gabe von geringen Mengen Muskelrelaxans. Kein Laryngo-spasmus. Gute Muskelrelaxation. Blutdruck, Puls konstant. Gute Analgesie.

d. Rechteckimpulsstrom plus Breitbandrauschen:

McIntyre (1965)	Frequenzbe-reich des Breitbandr. bis 500 KHz. Impuls-strom: Frequenz: 100-200 Hz Impulsdauer: 0,2; 0,1 msec	Scheitel-Gaumen, Occiput-Augen	Hunde	33 mA Breiband.	Niemals ruhiger Zustand er-zielt. Niemals Analgesie. (Breit-bandrauschen allein, ruhiger Zu-stand, aber keine Analgesie. Bei höheren Stromstärken Muskel-spasmen mit Atembeschwerden.)

B. Betäubung mit kurzzeitig fließenden Strömen

Als Elektronarkose wurde auch des öfteren eine Betäubungsart bezeichnet, bei welcher der elektrische Strom nur kurzzeitig auf das Zentralnervensystem einwirkte. Nach einem solchen Stromstoß konnte ein Zustand mit Bewußtlosigkeit und Anästhesie unterschiedlicher Länge beobachtet werden. Diese Methode erinnert sehr stark an den Elektroschock. Der Terminus "Elektronarkose" sollte eigentlich nicht für eine solche Betäubung verwendet werden, sondern für einen narkoseähnlichen Zustand vorbehalten bleiben, bei welchem während der gesamten Betäubungsdauer der elektrische Stromfluß aufrecht erhalten bleibt.

Zunächst ist hier an die Wechselstrombetäubung von Schlachtvieh zu denken, die von Bockelmann 1902 eingeführt wurde. Die anfängliche Längsdurchströmung der Tiere wurde wegen der heftigen Wirkung auf das Herz zu Gunsten einer Querdurchströmung des Kopfes aufgegeben. Die Tiere brachen unter Krämpfen zusammen; es traten starke Erregungserscheinungen, Laufbewegungen, tonisch-klonische Krämpfe und epileptische und kataleptische Zustandsbilder mit Atmungsstillstand auf. Nach Stromunterbrechung fielen die Tiere in einen schlaffen Lähmungszustand, waren betäubt und zeigten keine Reaktion auf Schmerzreize. Nach wenigen Minuten erwachten die Tiere wieder.

Zu einer solchen "Elektroschocknarkose" gehören auch die Untersuchungen von Tzonis (1935,1936) an Insekten und Myriopoden. Die Tiere wurden auf ein befeuchtetes Filtrierpapier gesetzt, an welches ein elektrisches Feld eines galvanischen Stromes oder eines pulsierenden Gleichstromes (gleichgerichteter Sinuswechselstrom) mit einer Stärke von 50 - 400 mA angelegt wurde. Oder die Tiere wurden in einem Wassertrog mit einer Stromdichte von 12-15 mA/qmm durchströmt. Nach dem Ausschalten des kurzzeitig fließenden Stromes waren die Tiere bis zu 14 Minuten betäubt; die Tiere konnten verstümmelt werden, ohne daß eine Schmerzreaktion auftrat. Dieser Zustand wurde auch "Elektrometanarkose" genannt.

Ivy und Barry (1932) behandelten Hunde mit Stromstößen, welche sich durch verschiedene Parameter (Rechteckimpulsgleichströme; Frequenz: 100 - 163 Hz; Verhältnis Impulsdauer zu Periodendauer: 1:10 bis 8:10; Spannung: 12-110 Volt) auszeichneten. Die Elektroden lagen in den beiden Meatus acustici externi oder am Hinterkopf und über der Lumbalwirbelsäule oder am Kopf und am unteren Teil des Rückens. Mit dem Stromschluß setzte eine Muskelrigidität und ein Spasmus der Extensoren ein. Die Tiere fielen zur Seite. Bei einer Stromflußzeit von 30 Sekunden kam auch ein Tremor der Kiefer und der Beine vor. Die Respiration stand in tiefer Inspirationsstellung still. Es wurde Kot und Harn entleert. Wenn der Stromkreis geöffnet wurde, erschlafften die Tiere, atmeten langsam und tief und zeigten manchmal Stoß- und Laufbewegungen. Die Schmerzreaktion blieb für 55 Sekunden bis zu 12 Minuten nach Beendigung des Stromstoßes aus. Ein Impulsstrom mit einem Verhältnis von Impulsdauer zu Periodendauer von 8:10 hinterließ keine, dagegen ein Strom mit einem Verhältnis von 3:10 die längste Anästhesie. Als günstigste Durchströmungszeit erwieß sich eine Dauer von 15 Sekunden.

Clark und Wall (1934) applizierten Katzen und Kaninchen, denen die Elektroden entweder zu beiden Seiten der Wirbelsäule dicht unter dem Occiput oder auch in den beiden Gehörgängen befestigt worden waren, kurze Stromstöße (einweggleichgerichteter Sinuswechselstrom; Frequenz: 10-400 Hz; Stromintensität: 30-80 Volt; bis zu 90 mA) Die häufig beobachteten Symptome, wie Muskelrigidität, Spasmus der Extensoren, Urination, Defäkation waren auch hier die Regel. Über die Dauer der Bewußtlosigkeit liegen keine Angaben vor. Die Tiere hatten durch die Behandlung keinen Schaden davon getragen.

Durch einen 30-sekundigen Stromstoß (Rechteckimpulsgleichstrom; Verhältnis Impulsdauer zu Periodendauer: 1:2; Frequenz: 280 Hz, welche als die günstigste aus einem Bereich zwischen 80 und 10 000 Hz ermittelt wurde; Elektrodenanordnung: zu beiden Seiten des Kopfes; genaueres s. unter Kapitel II D) versetzten Gualtierotti und Mitarbeiter Katzen in einen Zustand, der durch

Bewußtlosigkeit, Analgesie, Muskelerschlaffung, Schwund der Corneal- und Hautreflexe und Verringerung der Sehnen und Knochenreflexe charakterisiert war. Während der Stromapplikation traten vorübergehend Erscheinungen wie tonisch-klonische Anfälle, Atemstillstand, schneller Anstieg des Blutdruckes, Abnahme der Pulsfrequenz, Ejakulation auf. Das Erwachen aus der Betäubung erfolgte plötzlich; anschließend aber waren die Tiere sehr müde.

Hierher gehört auch die Elektroschockbehandlung, welche in der Psychiatrie bis in jüngster Zeit häufig angewandt wurde. Der Strom (Sinuswechselstrom; Frequenz: 100 Hz; Stromintensität: etwa 100 Volt) wurde über eine bitemporale Elektrodenanordnung zugeführt. Die Stromflußzeit betrug etwa 0,1-0,5 sec. Nach den Konvulsionen waren die Patienten für einige Minuten bewußtlos, wobei in einem relaxierten Zustand Dislokationen vorgenommen werden konnten (nach Longley 1949).

Longley berichtete, daß Freemann (1948) Patienten mit einem Elektroschock (150 Volt, 1 Sekunde Stromflußzeit) betäubte, um anschließend an ihnen eine präfrontale Leukotomie durchzuführen.

C. Elektronarkoseversuche an Menschen

Zur Klärung der strittigen Frage, ob während der Elektronarkose tatsächlich ein Bewußtseinsschwund auftritt und ob die beobachtete Analgesie nicht nur eine scheinbare ist, d.h. ob die Einwirkung des elektrischen Stromes auf das Zentralnervensystem die Versuchsobjekte nur unbeweglich und reaktionsunfähig, aber nicht wirklich schmerzunempfindlich macht, sollen die Versuche an Menschen zusammengestellt werden, da diese einer sprachlichen Exploration über die Empfindungen während der Elektronarkose zugänglich sind.

Leduc (1911) unterzog sich selbst einer Behandlung mit der von ihm entwickelten Methode. 2 mal 20 Minuten ließ er den Strom

(Frequenz: 100 Hz, Impulsdauer: 1 msec) mit einer Stärke von 4 mA (Spannung: 35 Volt) über eine Stirn und eine Lendenelektrode auf sich einwirken. Nach 4-6 Minuten war diese Intensität erreicht. Nach anfänglichen vorübergehenden unangenehmen, doch erträglichen oberflächlichen Empfindungen traten leichte Kontraktionen der verschiedenen Gesichts- und Körpermuskeln auf. (Zitat:) ".... Die Hemmung beginnt am Sprachzentrum, dann werden die motorischen Zentren vollkommen ausgeschaltet ..... Ich fühlte die Kontaktstellen, das Zwicken, das Stechen in den Vorderarmen, aber die Gefühle waren erschlafft, wie bei einem vollkommen eingeschlafenen Glied." Das zeitweise auftretende Stöhnen wurde auf eine direkte Reizung der Larynxmuskeln zurückgeführt. Die Empfindungen, die einem Alpdrücken angesichts einer großen Gefahr, wobei man nicht schreien und sich bewegen kann, ähnlich waren, wurden als sehr unangenehm geschildert. Leducs Kollegen unterbrachen jedesmal, bevor das Bewußtsein und die Sensibilität erloschen war, den Strom, in der Meinung, eine vollkommene Wirkung erzielt zu haben. Am Ende des Versuches fühlte sich Leduc ganz normal und hielt im Anschluß daran einen Vortrag.

Leclerc (1910) operierte 2 Patienten unter einer leducschen Elektronarkose. In beiden Fällen war die Ausschaltung des Bewußtseins gelungen. Das Excitationsstadium war sehr stark ausgeprägt und wesentlich heftiger, als bei einer Äthernarkose. Nach einer 1-minutigen Operation eines inoperablen Uteruskarzinoms unter einer Elektronarkose, während welcher Zuckungen im Gesicht auftraten, ein Keuchen zu hören war, die Atmung unverändert und der Puls verlangsamt war, erwachte die Patientin sofort und gab nach einer kurzzeitigen Benommenheit an, von der Operation nichts gespürt zu haben. Während einer 50-minutigen Operation eines Wangenkarzinoms einer 80-jährigen, arteriosklerotischen Patientin wurde bei Stromstärken von 30 mA Atmungsirregularitäten, Pulsbeschleunigungen, Zuckungen im Gesicht und in den Gliedern beobachtet. Die Patientin erwachte sofort nach Stromöffnung, fiel aber bald in eine Somnolenz und starb nach 4 Tagen. Der Sektionsbefund ergab eine Erweichung in der capsula interna bei einer schweren Arteriosklerose des Gehirns.

5 Elektronarkoseversuche an Menschen mit der Technik von Leduc hatte Hertz im Jahre 1933 durchgeführt. In fast allen Fällen mußten starke Atembeschwerden, Muskelanspannungen, die in Krämpfe übergehen konnten, teilweise excessive Salivation, einmal Kot- und Harnentleerung festgestellt werden. Ein Teil der Patienten wehrte sich auf schmerzhafte Reize, obwohl die Stromstärke bis auf 18 mA hochreguliert wurde, andere wieder zeigten keine Reaktionen, gaben aber nach dem Versuch an, alle Reize, wenn auch abgeschwächt, gespürt zu haben. Während der Behandlung bestand eine Sprachlähmung. Einige Patienten berichteten, daß sie ein sehr unangenehmes Gefühl des "Sterbenmüssens" des "Erstickens" gehabt hätten. Das Bewußtsein war also des öfteren erhalten geblieben.

Frostig (1944) berichtete von über 100 Elektronarkosebehandlungen von 9 Geisteskranken. Nachdem Harreveld an Hunden die Vorarbeit geleistet hatte (s.o.), versuchte man diese Technik (Sinuswechselstrom; Frequenz: 60 Hz) an Menschen. Über eine bitemporale Elektrodenanordnung wurden den Patienten initial für 30 sec Stromstärken von 150 - 250 mA appliziert. Das sich daran anschließende Narkosestadium wurde mit Stromstärken zwischen 45 und 90 mA aufrecht erhalten. Die von den Tierversuchen schon bekannten Symptome, nämlich ein narkoseähnliches Verhalten, das sich abwechselte oder vermischt war mit hyperkinetischen Reaktionen, wurden auch von Frostig an Menschen registriert. Die Pupillen waren verengt und reagierten nicht auf Lichteinfall. Das Bewußtsein schwand während der Einleitungsperiode. Kein Patient beklagte sich nach der Behandlung über irgendwelche unangenehme Empfindungen. Manche Patienten hatten höchstens eine sehr unklare Erinnerung an den letzten Teil der Elektronarkose, welche sich über einen Zeitraum von 30 Minuten erstreckte. Ähnliche Versuche wurden von Thompson (1944), Tietz (1946) und Patterson, Milligan (1947) an Geisteskranken durchgeführt. Während bei der Behandlung von Psychosen ein gewisser Erfolg zu verzeichnen war - z. B. konnten Halluzinationen Schizophrener zum Verschwinden gebracht werden - und diesbezüglich die Elektronarkose dem Elektroschock überlegen zu sein schien, hielt Thompson (1944) diese Narkose für chirurgische

Zwecke für unbrauchbar.

Mit der von ihm selbst entwickelten Methode (Sinuswechselstrom; Frequenz: 700 Hz) elektronarkotisierte Knutson (1956) fünf Patienten einer Nervenklinik. Nach einer Atropingabe und einer endotrachealen Intubation wurde den Patienten eine Stromstärke bis zu 150 mA (Spannung: 34 Volt) über eine bitemporale Elektrodenlokalisation zugeführt. Es wurden starke tonische Kontraktionen der Muskulatur, Atemstillstand und Laufbewegungen der Arme und Beine beobachtet, 3 Patienten gaben nach der Behandlung an, daß sie während der Prozedur bewußtlos waren, nichts gespürt hätten und keine Erinnerung mehr daran hätten. Ein Patient, bei welchem die Stromstärke auf 105 mA gesenkt worden war, erzählte hinterher, daß er quälende Mißemfindungen gehabt hätte; bewegen konnte er sich aber nicht. In einem Fall war das Bewußtsein teilweise erhalten geblieben und die Sensibilität nicht völlig aufgehoben. Einmal wurden nach einer 15-minuten Behandlung mit 150 mA psychologische Veränderungen festgestellt, die sich darin äußerten, daß der Patient auf Fragen keine Antwort gab, nur freundlich lächelte und unartikulierte Worte von sich gab. Der Zustand hielt einige Monate an. Aber nach einer intensiven Psychotherapie kehrte das ursprüngliche, präelektronarkotische Verhalten wieder zurück. Wegen beträchtlicher Kreislaufkomplikationen, wie Hypertension, Tachykardie und Herzarrhythmien unterbrach Knutson die Experimente an Menschen.

Hardy, Fabian (1961) berichteten von 12 Patienten, die unter einer Elektronarkose operiert worden waren. Die Prämedikation bestand aus einer Gabe von 75-100 mg Sekobarbital und 0,8 mg Atropin. Unter 200 mg Thiamylal und 50 mg Succinylcholin wurde endotracheal intubiert. Um während der Elektronarkose generalisierte Muskelspasmen zu verhüten, wurden laufend geringe Mengen von Muskelrelaxantien gegeben und künstlich beatmet. Innerhalb von 15 Sekunden wurde der Strom (Sinuswechselstrom; Frequenz: 700 Hz; bitemporale Elektrodenanordnung) auf eine Stärke von 50-110 mA (Spannung: 12-47 Volt) gebracht. Die Narkose

wurde bis zu 4 Stunden aufrechterhalten. Es wurden Salivation, Piloerrektion, im Initialstadium Hypertension, Tachycardie und einige Extrasystolen registriert. Nach der Stromkreisunterbrechung waren alle Patienten innerhalb von 2-5 Minuten wieder vollkommen normal und reaktionsfähig. 1964 lieferte Fabian weitere Berichte von 8 Elektronarkoseexperimenten, bei welchen chirurgische Operationen, wie Laparotomie, Mastektomie, Herniotomie, Gastrostomie und Hauttransplantationen vorgenommen wurden, und von 5 Versuchen an Freiwilligen. In einer Zusammenstellung der Erfahrungen, die man mit dieser Elektronarkose bei insgesamt 20 Operationen gemacht hatte, kam man auf Grund der Angaben der Patienten zu der Feststellung, daß nur in 10 Fällen, also nur in 50 % der Fälle, keine Erinnerung an die vorhergehenden Manipulationen bestand. Vier Patienten hatten keine genügende Analgesie und Amnesie. 6 Patienten waren zwar schmerzunempfindlich, konnten sich aber mehr oder weniger deutlich an Vorgänge, die sie gesehen und gehört hatte, erinnern. Von den 5 Freiwilligen konnten noch 4 nachträglich von Eindrücken, die sie während der Elektronarkose aufgenommen hatten, berichten.

Price und Dornette (1963) operierten 50 Patienten unter einer Elektronarkose, die derjenigen von Hardy und Fabian sehr ähnlich war. Atropin, Barbiturate und Muskelrelaxantien unterstützen die Elektronarkose. Nach Price und Dornette konnte zu 80-85 % die Beobachtung der Pupillen einen wertvollen Hinweis auf die Tiefe der Anästhesie geben: Wenn zu wenig Strom zugeführt wurde, waren die Pupillen mäßig dilatiert, nicht zentriert und reagierten normal auf Lichteinfall. Bei geeigneter Elektronarkosetiefe waren die Pupillen relativ klein und zeigten nur eine geringe oder gar keine Reaktion auf Licht. Wenn zuviel Strom, als notwendig war, appliziert worden war, waren die Bulbi zentriert, doch die Pupillen waren stark erweitert und reagierten übermäßig auf Lichteinfall. Ein mäßiger Blutdruckanstieg lieferte nach Ansicht dieser Forscher einen weiteren Hinweis auf die richtige Narkosetiefe. Alle Patienten in einem Alter von unter 20 Jahren, welchen Stromstärken zwischen 80 und

120 mA verabreicht worden waren, hatten eine ausgezeichnete Anästhesie gehabt, ohne sich an irgendwelche Ereignisse, die während der Narkose vor sich gingen, zu erinnern. Aber bei den Erwachsenen, denen Stromstärken von 120-130 mA gegeben worden waren, mußte doch des öfteren ein Mißlingen festgestellt werden, was zu 50 % auf Elektrodenbewegungen zurückzuführen war. In etwa 22 % der Fälle war keine ausreichende Anästhesie erzielt worden: Es wurden Schmerzen und volle Orientiertheit während der Operation angegeben. Weitere 14 % hatten eine dunkle, ungenaue Erinnerung an Schmerzen und Unannehmlichkeiten.

Auch Smith (1965) unternahm mit seiner Methode Elektronarkoseversuche an Menschen. In 12 Experimenten an 9 Freiwilligen mußten hauptsächlich 3 Arten von unangenehmen Nebenerscheinungen festgestellt werden: 1. Durch den Gleichstrom (20 mA) wurden Verbrennungen verursacht, welche schmerzhaft, aber doch erträglich waren. Wenn die Elektrodenflüssigkeit frei von Kalium gehalten wurde, war diese Art von Unannehmlichkeiten weitgehend behoben. Lidocain eliminierte diese Schmerzen ganz. 2. Durch die heftige Kontraktion der Skalpmuskulatur wurden Vibrations- und Druckgefühle verursacht. Ein Rechteckimpulsstrom (bis 10 mA) mit einer Frequenz von 500-700 Hz und einer Impulsdauer von 0,1-0,2 msec (statt 100 Hz und 2 msec) schaltete die Vibrationsempfindungen aus. Die Schmerzen infolge der starken Muskelspasmen konnten auch durch Lidocain nicht unterdrückt werden. 3. Bei einer intraoralen Elektrodenlage traten häufig Zahnschmerzen auf. Deswegen wurde bei Menschen eine fronto-occipitale Elektrodenanordnung gewählt. Ein metallischer Geschmack wurde von den Versuchspersonen angegeben, wenn Zahnfüllungen vorhanden waren.

Loucas (1965) experimentierte an Geisteskranken mit Wechselströmen oder hochfrequenten pulsierenden Strömen (keine genauen Angaben). Das Gehirn der Patienten wurde für 2 bis 20 Minuten mit einem 200-250 mA starken Strom (Spannung: 200-250 V)

durchströmt (keine genauen Angaben über Elektrodenlokalisation). Starke Muskelkontraktionen, Salivation, Lakrimation, Pupillendilatation, Erregung der m.erectores pili, Blutdruckschwankungen und gelegentlich vorübergehende Herzarrhythmien wurden beobachtet. Nach Loucas ist es leicht möglich, daß das Bewußtsein während der Behandlung erhalten bleibt. Die Patienten hatten unangenehme Empfindungen durch die Muskelspasmen, schmerzhafte Parästhesien und Kribbeln in der Kopfhaut, im Gesicht und in den Extremitäten. Bei Schizophrenie habe diese Elektronarkose einen gewissen Erfolg.

Tabelle 6: Übersicht über die Elektronarkoseversuche an Menschen

Untersucher	Stromart	Elektroden-anordnung	Stromstärke	Erfolg
Leduc (1911)	Rechteck-impulsstr. Frequenz: 100 Hz Impulsdauer: 1msec	Kathode an Stirn, Anode an Lendenwirbelsäule	4 mA 35 V	Selbstversuch. Kontraktionen der Gesichts- und Körpermuskulatur. Stöhnen wegen direkter Reizung der Larynxmuskeln. Unangenehme Empfindungen (Alpdrücken). Keine völlige Analgesie. Bewußtsein blieb erhalten.
Leclerc (1910)	Leduc-strom	wie bei Leduc	bis 30 mA	2 Narkosen bei Operationen. Sehr heftiges Excitationsstadium. Zuckungen im Gesicht und der Glieder. Puls verlangsamt. Analgesie. Bewußtseinsverlust.
Hertz (1933)	Leduc-strom	wie bei Leduc	bis 18 mA	5 Narkosen bei Operationen. Atembeschwerden, Muskelanspannungen, manchmal Krämpfe, Defäkation, Urination. Sprachlähmung. Nicht immer Analgesie und Bewußtseinsverlust. Unangenehme Empfindungen (Ersticken, "Sterbenmüssen").

Untersucher	Stromart	Elektroden-anordnung	Stromstärke	Erfolg
Frostig (1944)	Sinus-wechsel-strom Frequenz: 60 Hz	bitemporal	initial, 30 sec lang 150-250mA, dann 45-90 mA	9 Behandlungen von Patienten der Psychiatrie. Zuerst elektroschockartige Symptome. Dann häufig Unruhe, klonische Zuckungen. Atembeschwerden. Oft hyperkinetische Reaktionen. Keine unangenehmen Empfindungen. Bewußtseinsverlust.
Knutson (1956)	Sinus-wechsel-strom Frequenz: 700 Hz	bitemporal	bis 150 mA 34 V	5 Narkosen. Atropingabe, Endotracheale Intubation. Starke tonische Muskelkontraktionen. Atemstillstand. Laufbewegungen der Arme und Beine. Einmal blieb Bewußtsein und Sensibilität erhalten.
Hardy,Fabian (1961,1964)	Sinus-wechsel-strom Frequenz: 700 Hz	bitemporal	50-110 mA 12-47 V	20 Narkosen bei Operationen. Prämedikation: 75-100 mg Secobarbital, 0,8 mg Atropin, unter 200 mg Thiamylal und 50 mg Succinylcholin endotracheale Intubation. 10 Patienten Amnesie. 4 keine genügende Analgesie und Amnesie. 6 hatten zwar Analgesie, aber Erinnerung an Manipulationen.

Untersucher	Stromart	Elektroden-anordnung	Stromstärke	Erfolg
Price, Dornette (1963)	Sinus-wechsel-strom Frequenz: 700 Hz	bitemporal	Kinder: 80-120 mA Erwachsene: 120-130 mA	50 Narkosen bei Operationen. Gabe von Atropin, Barbituraten, Muskelrelaxantien. Bei Kindern ausgezeichnete Anästhesie. Bei Erwachsenen 22 % keine ausreichende Anästhesie, Erhaltung des Bewußtseins. 14 % dunkle Erinnerung an Schmerzen und Unannehmlichkeit.
Smith (1965)	Kombinier-ter Gleich-strom plus Rechteckim-pulsstrom. Frequenz: 500-700 Hz Impulsdauer: 0,1-0,2 msec	fronto-occipital oder Schei-tel-intra-oral	20 mA Gleich. bis 10 mA Impuls.	12 Narkoseversuche. Schmerzhafte Empfindungen an Elektrodensitz infolge der Verbrennungen. Schmerzen infolge von Muskelspasmen an Skalpmuskulatur. Zahnschmerzen bei intra-oraler Elektrodenlage.
Loucas (1965)	Wechsel-strom oder hochfrequ-ente pulsie-rende Ströme	keine genau-en Angaben	200-250 mA	50 Behandlungen von Patienten der Psychiatrie. Starke Muskelkontraktionen, Blutdrucksenkung, Herzarrhythmien. Teilweise Erhaltung des Be-wußtseins, unangenehme Empfindungen.

III. Physikalische und chemische Grundlagen.

A. Die Bedeutung der Stromkurve

Auf Grund des Literaturstudiums muß es als feststehende Tatsache gelten, daß es mit den verschiedenartigsten Stromarten bei einer genügend hohen Stromstärke möglich ist, einen Zustand herbeizuführen, bei welchem das Bewußtsein und die Sensibilität mehr oder weniger beeinträchtigt ist und die willkürlichen Bewegungen aufgehoben sind. Zwar war Leduc der Meinung, daß der Sinuswechselstrom für eine Elektronarkose ungeeignet sei, doch Harreveld (1942) narkotisierte Tiere sowohl mit einem leducschen Strom als auch mit einem Sinuswechselstrom, wobei nur geringe Unterschiede festzustellen waren. Auch Poznak (1963) fand keine Abweichungen hinsichtlich der Wirkung von Sinus-, Rechteck- und Impulsströmen. Auch Smith (1965) stellte in einer seiner neuesten Veröffentlichungen fest, daß es für die Erzeugung einer Elektronarkose bei Affen gleichgültig ist, welche Stromart verwendet wurde. Ein Gleichstromgrundpegel sei nicht von wesentlicher Bedeutung bei den Versuchen an Affen; jede Art von Reizstrom könne einen narkoseähnlichen Zustand herbei führen, wobei der Sinuswechselstrom für Affen am günstigsten sei.

1. Die unterschiedliche Wirkung von Gleichstrom und Impulsströmen

Der Gleichstrom ist ganz anderer Natur als die übrigen Impulsströme, wozu hier auch die Sinuswechselströme gerechnet werden. Er hat einen von den anderen Stromarten differenten Einfluß auf den Organismus: Die pulsierenden periodischen oder aperiodischen Ströme sind im Gegensatz zum galvanischen Strom im wesentlichen Reizströme. Scheminzky, der immer wieder auf die starke stimulierende Wirkung der pulsierenden Ströme hinwies, nannte diese Stromarten "tetanisierende Ströme", da die Tiere unter ihrem Einfluß in mehr oder weniger deutliche tetanische Kontraktionen verfielen (1941). Harreveld (1942) meint sogar, daß der narkotisierende Effekt der Reizwirkung des elek-

trischen Stromes auf das Zentralnervensystem zuzuschreiben sei, da bei einer bitemporalen Elektrodenanordnung mit einem Gleichstrom nur schwer und ungenügend eine Narkose produziert werden konnte.

Andererseits ist die Feststellung von Adler (s. unter Kapitel III D) (1932) und von Scheminzky (1941) bemerkenswert, daß allein mit dem absteigenden galvanischen Strom ein narkoseähnlicher Zustand zu erzeugen sei, während der aufsteigende galvanische Strom und die pulsierenden Ströme nur heftige Reizerscheinungen, die sich bis zu starken Krämpfen steigern konnten, hervorriefen. Dabei konnte auch Unbeweglichkeit und Reaktionslosigkeit auftreten.

2. Die Bedeutung des Gleichstromes bei den kombinierten Strömen.

In wiederholten Versuchen ermittelte Smith (1965) eine direkte Beziehung zwischen der Annehmlichkeit der Elektronarkose und der Höhe des Gleichstromniveaus. Während die Amplitude des einzelnen Stromimpulses, die Spitzenspannung, für den Wirkungsgrad, d.h. für die Narkosetiefe, verantwortlich war, unabhängig davon, mit wieviel Prozent der Impulsstrom an der Gesamtstromstärke beteiligt war, erwies sich das Ausmaß des Gleichstromanteiles als ausschlaggebend für das Fehlen von unangenehmen Nebenerscheinungen. War der Gleichstrom zu 60 - 80 % an der Gesamtstromstärke beteiligt, so wurden die Unannehmlichkeiten gering gehalten.

Auch Schuy und Wageneder (1965) machten die Erfahrung, daß ein entsprechender Gleichstromanteil eine gewisse Beruhigung mit sich bringt. Deswegen wurden alle verwendeten Stromarten (Rechteckimpulsströme, Sinuswechselströme, Breitbandrauschen) einem Gleichstromniveau, welches empirisch am jeweiligen Versuchstier ermittelt worden war, überlagert.

3. Die Bedeutung der Anstiegsgeschwindigkeit der Stromimpulse

Steigt der Stromimpuls nur langsam an, dann wird die Schwelle

der Erregbarkeit laufend in die Höhe getrieben und es wird keine Reaktion ausgelöst, obwohl Stromstärken verwendet werden, die bei steilem Stromanstieg weit überschwellig wären. Diese Erscheinung nennt man "Akkomodation". Um einen Reizerfolg zu erzielen, ist also nicht allein die Stromänderung notwendig, sondern es muß auch diese Stromänderung mit einer gewissen Geschwindigkeit erfolgen. Bei einem Sinuswechselstrom und einem gleichgerichteten Sinuswechselstrom mit Frequenzen unter100 Hz macht sich die Akkomodation deutlich in einem Anstieg der für einen Reizerfolg, speziell für eine Elektronarkose notwendigen Stromstärke bemerkbar (Harreveld 1942).

Andererseits ist es möglich, unterschiedlich reizbare Gebilde selektiv zu stimulieren (Henßge 1955), indem man die Reizimpulse mit verschiedenen Anstiegsgeschwindigkeiten ausstattet. Dies beruht auf der Tatsache, daß Gebilde, die eine gute Akkomodationsfähigkeit haben, nur durch steil ansteigende Impulse erregt werden können, während bei schlechter Akkomodation auch flacher ansteigende Stromimpulse, z. B. Exponentialströme Reizantworten auslösen.

So empfahl Henßge (1955) Impulse mit einer Anstiegsdauer von 10 msec, um eine trophotrope Wirkung zu erreichen, z. B. für eine Schlafbehandlung (Augen-Nacken-Elektrodenanordnung). Eine sympathikotrope Reizbehandlung, z. B. eine Therapie von Impotenz, wurde mit Stromimpulsen durchgeführt, die in einem Zeitraum von 1 msec bis zu ihrem Maximum anstiegen.

4. Die Bedeutung der Impulsdauer

Ein sehr wesentlicher Parameter des Reizstromes ist die Dauer des einzelnen Stromimpulses. Irritable Gewebe, die eine kurze Chronaxie haben, sprechen auf lange, wie auf kurze Reizimpulse an, träge reagierende dagegen besser auf lange. Die Chronaxie für die motorischen Hirnbezirke, die während eines operativen Eingriffes auch bei Menschen bestimmt worden ist, soll nach

Giljarowski (1956) zwischen den Grenzwerten von 0,1 und 2 msec liegen.

Eine Reihe von Experimenten wurden durchgeführt, um den Einfluß der Impulsdauer bei Rechteckströmen auf die Elektronarkose zu prüfen.

Da v. Neergard (1922) bei Tieren kein genügend scharfes Kriterium für den Grad der narkotisierenden Wirkung der verschiedenen Ströme finden konnte, beobachtete er die motorischen Reizerscheinungen, etwa eine eben fühlbare Kontraktion der Nackenmuskulatur oder eine Dauerkontraktion, die auch einen Maßstab für die Intensität des Reizeffektes auf das Zentralnervensystem abgaben. Bei der Untersuchung der Impulszeiten von 0,5, 1,9, 3,5, 5,9 und 8 msec, wobei eine Frequenz von 100 Hz beibehalten wurde, hatte man gefunden, daß die durchschnittlichen Stromstärken für den gleichen Reizerfolg bei 0,5 und 1,9 msec nicht, aber bei weiterer Verlängerung der Impulszeiten beträchtlich erhöht werden mußten, wobei die Tiere einer verstärkten Gefahr ausgesetzt waren.

Scheminzky (1924) veränderte das Verhältnis von Stromflußzeit zu Periodendauer (1/10; 3/10; 5/10; 7/10; 10/10;) bei Leducströmen mit Frequenzen von 25 und 50 Hz. Obwohl der arithmetische Mittelwert der Stromstärke, bzw. die durchschnittliche Stromstärke mit zunehmender Impulsdauer für die Elektronarkose von Fischen angehoben werden mußte, wenn die Amplitude des Impulses gleichgehalten wurde, trat keine Veränderung im Verhalten der Tiere ein. Diese unterschiedlichen Ströme hatten also die gleiche physiologische Wirkung.

Sack und Koch (1933) bestimmten die Schwellenstromstärken von Leducströmen für Strecktetanus und Atemstillstand an Kaninchen, wobei das Verhältnis von Stromflußzeit zu Periodendauer geändert wurde (1/10; 2,2/10; 5/10; 7,8/10; 9/10;) und die Frequenz von 100 Hz beibehalten wurde. Auch hier stellte sich heraus, daß mit zunehmender Impulslänge auch die durchschnitt-

liche Stromstärke erhöht werden mußte, wenn man gleiche Reaktionen erhalten wollte. Hatte man jedoch die Amplitude der einzelnen Stromimpulse berechnet (aus der Beziehung: durchschnittliche Stromstärke multipliziert mit der Frequenz dividiert durch die Impulsdauer I. $f:\tau = \hat{\imath}$), so kam man zu der Feststellung, daß diese Werte innerhalb einer gewissen Fehlergrenze annähernd gleich waren. Demnach kann die Amplitude des einzelnen Impulses als Maß für die Wirksamkeit des Reizstromes angesehen werden.

Harreveld (1942) ermittelte die Abhängigkeit der für eine Elektronarkose erforderlichen Stromstärke von der Impulsdauer (0,08; 0,3; 0,5; 1,5; 2 msec). Er kam zu dem Ergebnis, daß mit kürzer als 0,5 msec werdenden Impulszeiten die notwendigen durchschnittlichen Narkosestromstärken exponentiell anstiegen, während bei Änderungen der Impulslänge zwischen 0,5 und 2 msec fast keine Stromregulierungen vorgenommen werden mußten. Aus dieser Kurve, die der am peripheren Nerven gewonnenen Reizzeit-Spannungskurve sehr ähnlich ist, ermittelte Harreveld für die Elektronarkose als Rheobase 75-140 mA und als Chronaxie ungefähr 0,14 msec.

Klemm (1964) objektivierte an Hand eines Punktsystems den Intensitätsgrad der während der Einleitungsperiode auftretenden Reaktionen. Folgende Parameter wurden untersucht: 1) Impulsdauer: 0,7 msec; Frequenz 100 Hz; Verhältnis von Impulsdauer zu Periodendauer 0,7/10. 2) 2msec; 66 Hz; 1,3/10. 3) 3 msec; 66 Hz; 2,2/10. 4) 3 msec; 100 Hz; 3/10; 5) 0,8 msec; 526 Hz; 4,2/10. 6) 1 msec; 700 Hz; 7/10. Als Ergebnis wurde gefunden: a. Je kürzer die Impulsdauer bei gleichbleibender Frequenz ist, eine desto geringere durchschnittliche Stromstärke benötigt man für die Elektronarkose. Mit kürzer werdenden Impulszeiten verstärken sich die Reizerscheinungen während der Induktionperiode.
b. Bei unterschiedlichen Frequenzen und Impulszeiten ist eine umso größere Stromintensität notwendig, je höher das Verhältnis von Impulsdauer zu Periodendauer ist. Mit diesem ansteigenden Verhältnis werden aber die Erregungserscheinungen während der

Einleitung geringer, zusätzlich kann die Einleitungsperiode ohne Gefährdung des Tieres verkürzt werden.

Als Zusammenfassung dieser Versuche kann gesagt werden, daß in einem Impulszeitenbereich etwa zwischen 1-9 msec die durchschnittliche Stromstärke erhöht werden muß, um einen festgelegten Reizerfolg oder eine Elektronarkose zu erzielen (Neergard, Scheminzky, Sack und Koch, Klemm). Dagegen bleibt die Amplitude des einzelnen Stromimpulses konstant, welche somit als ausschlaggebend betrachtet werden muß. Ab einer Impulsdauer von ungefähr 1 msec muß also die Schwellen-Spitzenstromstärke für eine festgelegte Reaktionsweise nicht mehr erhöht werden. Folglich kann auch hier, analog einer Reizzeitspannungskurve vom peripheren Nerven, von einer Rheobase gesprochen werden. (v. Harreveld wandte den Begriff "Rheobase" nicht in dem festgelegten Sinne an, da er ihn auf die durchschnittliche Stromstärke bezog und nicht auf die Spitzenstromstärke, welche als die eigentliche Reizintensität betrachtet werden muß, wenn man sich auf das Nernstsche Gesetz beziehen will).

Wie die Verhältnisse unterhalb einer Impulszeit von 1 msec liegen, wird durch folgende Versuche von Sack und Koch (1933) erhellt:

Es wurde ein Frequenzbereich zwischen 25-23 000 Hz (25,50,100, 150,200,300,476,756,1160,2325,4550,5700,11 300,23 000 Hz) bei einem konstanten Verhältnis von Impulsdauer zu Periodendauer (1/10) untersucht. Es wurde innerhalb einer gewissen Streubreite folgende Gesetzmäßigkeit ermittelt: Die Schwellenstromstärke (Durchschnittswerte) für Strecktetanus und Atmungsstillstand bei Kaninchen bleiben bei Frequenzen bis zu 300 Hz praktisch konstant. In dem Frequenzbereich zwischen 300 und 1160 Hz stieg die Stromintensität proportional der Wurzel der Frequenz: $I \cdot 1/\sqrt{f} = \text{konst.}$ (Nernstsches Gesetz). Bei weiterer Steigerung der Periodenzahl nimmt die für den selben Reizerfolg notwendige Stromstärke proportional der Frequenz zu: $I \cdot 1/f = \text{konst.}$ (Weiß-Hoorwegsches Gesetz). Da bei diesen Untersuchungen die absolute

Impulsdauer (τ) zwischen 4 msec und 0,0044 msec verändert wurde und die Impulsamplitude, d.h. die Spitzenstromstärke ($\hat{I}$) direkt proportional zu der durchschnittlichen Stromstärke (I) ist ($I \cdot f/\tau = \hat{I}$; da f/τ = konst., folgt $\hat{I}$ = I. konst.) kann das Gesetz auch so formuliert werden: $\hat{I} \cdot \sqrt{\tau}$ = konst., bzw. $\hat{I} \cdot \tau$=konst. Ob diese Befunde auch auf die Schwellenstromstärken für die Elektronarkose übertragen werden dürfen, bleibt weiteren Forschungen überlassen.

Es muß aber auch berücksichtigt werden, daß bei einer bestimmten durchschnittlichen Stromstärke der Spitzenstrom mit abnehmender Impulsdauer beträchtlich erhöht ist; es resultiert eine erhebliche Spitzenbelastung, welche die Tiere sehr stark erregte und beunruhigte. Aus diesem Grunde wandelte Smith (1963) die von Anan'ev benutzte Impulsdauer von 1 msec in 2 msec um, da dadurch die Spitzenbelastung um die Hälfte verringert wurde.

Mit einer Impulsbreite von 2 msec konnte aber McIntyre (1965) keine ausreichende Narkosetiefe erzielen, weswegen er nur während der Einleitungsphase eine Impulsdauer von 2 msec verwendete, aber für die Aufrechterhaltung einer tiefen Narkose auf eine Impulsdauer von 1 - 1,4 msec überging.

(Wegen der sehr hohen Spitzenstromstärken wurden auch die Induktionsströme nicht für die Elektronarkoseversuche verwendet, worauf schon Leduc hinwieß und deswegen den Rechteckimpulsstrom entwickelte.

Nach Wageneder (1966) hat das Verfahren mit einem Breitbandrauschen gegenüber dem mit Impulsströmen den Vorteil, daß die Spitzenbelastung gering gehalten wird. Eine einfache Amplitudenbeschneidung konnte den störenden Rest beseitigen).

5. Die Bedeutung der Frequenz der Reizströme

a. Rechteckimpulsstrom

Nach Tschagowetz (1912) haben Frequenzen zwischen 70 und 240 [illegible]

(70, 100, 140, 210, 240 Hz) eines Leducstromes keine unterschiedliche Wirkung bezüglich des "elektrischen Schlafes", Ein Strom mit einer Frequenz von 20 Hz erzeugten nicht, wie ein höherfrequenter, einen anhaltenden Tetanus, sondern nur einzelne Zuckungen des ganzen Körpers. Bei einer Frequenz von 30-40 Hz würde der Schlaf besonders leicht und vollkommen eintreten.

Scheminzky (1924) verglich die Wirkung eines Stromes mit einer Frequenz von 25 Hz mit dem einer Frequenz von 50 Hz. Das Verhältnis von Impulsdauer zu Periodendauer wurde nicht verändert. Dabei benötigte der höherfrequente Strom für eine Elektronarkose eine höhere Stromdichte, aber die physiologische Wirkung beider Stromarten war dieselbe. Abweichende Ergebnisse ergaben sich bei einem Leducstrom von 10 Hz, da bei einer verstärkten Stromdosis die Fische im Rhythmus der Unterbrecherfrequenz zuckten, was bei einer höheren Frequenz nicht der Fall war.

Über die Frequenzuntersuchungen von Sach und Koch siehe im vorhergehenden Kapitel.

Harreveld (1942) ließ die Impulsdauer (0,17 msec) konstant. Bei niederen Frequenzen von etwa 5 Hz zuckten und zitterten die Tiere (Hunde, bitemporale Elektrodenanordnung) impulssynchron und konnten nicht in Elektronarkose gebracht werden. Innerhalb eines Frequenzbereiches von 15 - 500 Hz wurden keine wesentlichen Unterschiede beobachtet; ohne die Stromstärke wesentlich nachregulieren zu müssen, konnte eine Elektronarkose erreicht und aufrechterhalten werden. Eine weitere Frequenzsteigerung auf 500 - 1000 Hz hatte zur Folge, daß der "kinetische Typ" der Elektronarkose in den Vordergrund trat: die Tiere wurden unruhig und gerieten in Kontorsionen. Nur geringe Stromstärkeänderungen waren notwendig. Wurde die Frequenz auf 3000 Hz gesteigert, mußte die Stromstärke etwa verdoppelt werden im Vergleich zu den erforderlichen Stromstärken bei 120 Hz. Als Ursache wurde ein Polarisationseffekt angenommen.

Henßge (1955) betonte, daß bei den autonomen Nervenstrukturen die "Iterativität" eine Rolle spiele, d.h. daß gewisse Nerven-

gewebe nur durch eine Reizsummation erregt werden, die bei verschiedenen Strukturen verschieden stark sein muß: zur Stimulierung des Sympathikus verwendete Henßge einen Impulsstrom von 83 Hz, dagegen für eine trophotrope Reizbehandlung eine Frequenz von 10 Hz (Augen-Nackenelektrodenanordnung).

Sich auf die These von Liwanow stützend, die besagt, daß rhythmische elektrische Reize auf das Hirn die bioelektrischen Ströme beeinflussen können, und auf Grund der durch eigene Experimente und klinische Beobachtungen bestätigte Behauptung: "daß man durch Einwirkung eines Impulsstromes von niedriger Frequenz auf das Gehirn die Tätigkeit der Nervenzellen zur Ruhe, zur Hemmung hinlenken kann" (Zitat), benützten Giljarowski (1956) für den Elektroschlaf einen niederfrequenten (1-2 Hz) Strom, der die Entstehung einer Schutzhemmung begünstigen sollte (s. auch unter Kapitel V).

Klemm fand heraus, daß bei gleichbleibender Impulsdauer die zur Elektronarkose erforderliche Stromstärke umso größer ist, je höher die verwendete Frequenz ist. Zugleich aber verringerten sich die initialen Reizerscheinungen und die Induktionszeit konnte verkürzt werden, ohne die Tiere zu schädigen.

Bei Versuchen an Menschen hatte Smith (1965) den Eindruck, daß wegen einer schnelleren und glatteren Einleitungsperiode und geringeren Unannehmlichkeiten (z.B. Fibrationen und Schmerzen der Skalpmuskulatur) eine Frequenz von 500-700 Hz bei einer Impulsdauer von 0,1 - 0,2 msec der von 100 Hz vorzuziehen sei. Frequenzen von über 1000 Hz zeigten gegenüber denen von 500 - 1000 Hz keinen Vorteil; doch die Einleitungsphase soll ruhiger gewesen sein (Versuche an Affen 1965).

Auf Grund dieser Ergebnisse kann kein abschließendes Urteil über die günstigste Unterbrechungsfrequenz von Rechteckimpulsströmen gegeben werden.

b. Sinuswechselströme

Durch die Messung des intraabdominellen Druckes an Hunden, denen als Elektroden je eine Nadel in das rechte Vorderbein und das linke Hinterbein eingestochen wurde, gewann Gerstner (1936) Aufschluß über den Kontraktionszustand der Körpermuskulatur während der Durchströmung mit einem sinusförmigen Wechselstrom. Es wurde ein Frequenzbereich von 50 - 10000 Hz durchmustert. Bei den angewandten Dauerstromstärken von 10 - 15 mA konnte nun registriert werden, daß mit abfallender Frequenz der intraabdominelle Druck und somit die Kontraktionsintensität der gesamten Muskulatur wuchs. Es ließ sich dann jeder Stromstärke bis 150 mA eine Schwellenfrequenz zuordnen, oberhalb welcher keine wesentlichen Muskelkontraktionen auftraten. Bei Betäubungsversuchen erwies sich die Frequenz von 2000 Hz am günstigsten, da die Muskeln bei einem großen Effekt auf das Nervensystem nur gering stimuliert wurden.

Harreveld (1942) war es möglich, bei seinen Frequenzuntersuchungen zwischen 30 und 8000 Hz eine Beziehung zwischen der Schwellenstromstärke für Elektronarkose und der Sinuswechselstromfrequenz zu finden, welche am peripheren Nerven ermittelten Abhänigkeit der Reizschwelle von der Frequenz sehr ähnlich ist. Für eine tiefe Elektronarkose benötigt man ein Minimum der Stromstärke bei einer Frequenz von 100 Hz. Bei 30 Hz mußte die Stromstärke etwas erhöht werden, da sich bei niedrigen Frequenzen von Sinusströmen wegen der zu geringen Anstiegssteilheit der Halbwellen die Akkomodation bemerkbar machte. Bei 8000 Hz mußte die Stromintensität etwa um das 10-fache im Vergleich zu der bei 100 Hz verstärkt werden, wegen der zu kurzen Dauer der Reizimpulse, bzw. der Halbwellen. Was die Qualität der Elektronarkose betrifft, so beobachtete Harreveld, daß ab 500 Hz die Tiere unruhiger wurden, als bei niederen Frequenzen. Der "kinetische Typ" der Elektronarkose trat in den Vordergrund.

Für eine Elektronarkose mittels eines Sinuswechselstromes hielt Knutson (1954) Frequenzen zwischen 700 und 1500 Hz für am gün-

stigsten, da die initialen tonischen Spasmen minimal waren und keine klonischen Konvulsionen vorkamen.

Wulfsohn und McBride (1962) erhielten mit einer Frequenz von 1500 Hz die besten Ergebnisse. Die Analgesie, Muskelrelaxation und die Atmung war zufriedenstellend. Bei 700 Hz würde eine verstärkte Muskelspastizität eintreten.

Auch hier kann kein abschließendes Urteil über die geeignetste Frequenz von Sinuswechselströmen abgegeben werden.

B. Über die Elektrodenlokalisation

Sehr bedeutungsvoll für die Elektronarkose, bzw. für jede Art von elektrischer Anästhesie, ist die Lokalisation der Elektroden, mit welchen der Strom zugeführt wird. Die Fülle der Anbringungsmöglichkeiten kann folgendermaßen aufgegliedert werden:

1. Lokalisation der Elektroden in der Peripherie: Die elektrische Lokalanäesthesie.
2. Lokalisation der Elektroden nur über dem Rückenmark: Die elektrische Spinalanästhesie.
3. Lokalisation der Elektroden an Kopf einerseits und Rücken, bzw. Peripherie andererseits.
4. Lokalisation der Elektroden am Kopf

Mit der Lokalisation von 3. und 4. wurde eine Vollnarkose (mit Einschränkung natürlich) erreicht.

Zu 1.
Die im folgenden Abschnitt beschriebenen Versuche zur elektrischen Lokalanästhesie wurden ausschließlich an Menschen durchgeführt.

Leduc (1911) legte zu diesem Zwecke eine kleine differente Kathode über dem Nervus medianus am Handgelenk, die indifferente Anode irgendwo am Körper an und schickte durch diese Elektroden einige mA des von ihm entwickelten Rechteckimpulsstromes. Bei langsamer Steigerung der Stromstärke wurde unterhalb der dif-

ferenten Elektrode im ganzen vom n.medianus innervierten Gebiet ein juckendes Gefühl bemerkt. Nach einiger Zeit war die Sensibilität abgeschwächt; Stechen, Kneifen und Schneiden konnte nicht mehr unterschieden werden und wurde als nicht schmerzhaft empfunden. Nur diejenigen Nerven wurden ausgeschaltet, die unmittelbar unter der Haut lagen. Muskelkontraktionen waren für das Zustandekommen einer Lokalanästhesie hinterlich.

Robinowitsch (1910) legte die Kathode so, daß sie dem Zentralnervensystem näher gelegen war, z. B. am Bein über dem Trigonum Scarpae, und die Anode distal davon, z. B. über die vorderen cruralen Nerven. Unter einer elektrischen Lokalanästhesie, mit Stromstärken von 4 - 18 mA eines Leducstromes wurden von Johnson Zehen und einmal ein Bein amputiert. Die Operation geschah blutlos, da die Gefäße unter dem Stromeinfluß kontrahiert waren. Keiner der Patienten gab Schmerzen während der Amputation an. Es wurde nur ein Kribbeln gespürt.

v. Neergard (1922) beschrieb einen an sich selbst vorgenommenen Versuch von Lokalanästhesie an der Hand, bei welchem er eine indifferente (große) Anode am oberen Teil des Unterarmes und eine differente (kleinere) Kathode an der Beugeseite des Handgelenkes befestigte. Es zeigte sich bei Stromstärken von 4 mA eines Leducstromes (der Widerstand betrug 5000 Ohm), (Zitat): "... ein zunehmendes Gefühl von Surren der ganzen Hand, mit stark verminderter, aber nicht ganz erloschener Schmerzhaftigkeit auch bei starkem Kneifen mit einer chirurgischen Pinzette." Bei höheren Stromstärken traten tetanische Krampfzustände der kleinen Handmuskeln auf. Auch v. Neergard lehnte die Lokalanästhesie mit einem Leducstrom ab, da die Reizung der motorischen Nerven und damit die Muskelkontraktionen für eine Lokalanästhesie hinterlich sei.

Grain (1936) benützte zur lokalen Schmerzausschaltung einen Gleichstrom, wobei die Elektroden, die mit Kaliumjodid getränkt waren, über die schmerzhafte Stelle gebracht wurden, z. B. an Kopf, Schulter oder Thorax. Bei Stromstärken von 10 mA

war an der unter der Kathode gelegenen Stelle eine Analgesie aufgetreten.

Zu 2.
Eine reine elektrische Spinalanästhesie wurde nur selten ausprobiert. Über die Erfahrungen von Ivy und Barry (1932), die mit einer Elektrodenanordnung über Nacken und Lumbalwirbelsäule eine Schmerzunempfindlichkeit und Bewegungsunfähigkeit bei erhaltenem Bewußtsein erreicht hatten, wurde schon weiter oben (Kapitel II A2) berichtet.

Auch Silver und Gerard (1941), die Nadelelektroden in die Cisterna cerebellomedullaris und in den Wirbelkanal der Lumbalwirbelsäule ihrer Versuchstiere einstachen, erhielten mit einem Gleichstrom eine Spinalanästhesie, ohne die Großhirnfunktionen zu beeinträchtigen.

Zu 3.
Über die Bedeutung der Polarität.
Wenn die Elektroden in der Längsachse des Körpers angebracht wurden, dann spielt natürlich, wenn ein Gleichstrom angewendet wird, die Polarität der Elektroden und damit der Richtung des Stromflußes eine Rolle. Welche Bedeutung die Richtung des kontinuierlichen Gleichstromflußes hat, wurde schon unter dem Kapitel II A 1 eingehend erörtert.

Für den intermittierenden Gleichstrom hatte man bezüglich der Polarität folgendes herausgefunden:
Leduc betonte, daß der beste elektrische Schlaf hervorgerufen wird, wenn die Kathode am Kopf und die Anode am unteren Teil des Rückens lag. Bei einer umgekehrten Anordnung war eine größere Stromintensität notwendig und der erreichte Schlaf war weniger vollkommen.

Robinowitsch (1906) dagegen benötigte mit einer Kopf-Anode eine geringere Stromintensität für die Elektronarkose, aber wegen des Anstieges der Körpertemperatur und der erheblichen Dyspnoe, die bei dieser Anordnung auftrat, wurde eine Anbringung der Kathode

auf dem Kopf vorgezogen, weil keine Atembeschwerden auftraten und die Körpertemperatur sogar etwas abfiel.

v. Neergard (1922) fand hinsichtlich der qualitativen Wirkung des Leducstromes keine Unterschiede, wenn der Strom in verschiedenen Richtungen floß. Nur beim Aufsuchen der motorischen Reizschwellung zeigte sich, daß bei absteigender Stromrichtung höhere Stromstärken notwendig waren, als bei aufsteigender. Zu den gleichen Ergenissen kam Sack und Koch (1933).

Robinowitsch (1910) verwendete für ihre Elektroschlafversuche an Menschen eine ganz besondere Elektrodenanordnung: die Kathode wurde am vorderen Teil des Kopfes, die Anode an der rechten Handfläche befestigt. Nach einem anfänglichen kurzen Stadium, in welchem am Kopf kribbelnde Gefühle gespürt wurden, konnten die Probanten in einen erfrischenden Schlaf versenkt werden (Stromstärke: 0,75 mA; Leducstrom).

Dagegen hatten Sack und Koch (1933) nicht die gleichen Ergebnisse, wenn eine Elektrode nicht über dem Rückenmark saß. Zunächst wurde die Anode statt am Rücken am Unterkiefer befestigt, wobei die Kaninchen bei 2 mA nicht wie bei einer leducschen Elektrodenanordnung ad exitum kamen, sondern noch relativ munter waren. Nur im Bereich des Kopfes war die Schmerzempfindung abgestumpft. Aus diesem Versuch zog man den Schluß, daß die Einwirkung des Stromes auf das Gehirn nicht das Wesentlichste ist. Bei einer Reihe von weiteren Versuchen, bei welchen die Durchströmung des Kopfes ganz ausgeschlossen war (die Kathode saß an der rechten Brustseite oder im Nacken, die Anode am unteren Teil des Rückens), war die Schmerzempfindung genauso herabgesetzt wie bei der ursprünglichen Anordnung Leducs. Es fiel eine starke Schmerzhaftigkeit des leducschen Stromes auf, da die Tiere ihren Schmerz ungehemmt äußern konnten, weil der Kopf nicht vom Stromfluß betroffen wurde. Sack und Koch hielten auf Grund dieser Befunde die Meinung für gerechtfertigt, daß man bei der Elektronarkose weniger von einer cerebralen (Leduc), als vielmehr von einer spinalen Hemmung sprechen soll.

Zu 4.
Der Grund, warum es Leduc vermied, die Elektroden zu beiden Seiten des Kopfes anzubringen, war das Auftreten eines Schwindels, der am stärksten in Erscheinung trat, wenn die Elektroden in den äußeren Gehörgängen steckten. Setzte man die Elektroden beiderseits des Kopfes zwischen Augen und Ohren, so fielen die Tiere (Kaninchen) immer bei einer gewissen Stromintensität auf die Anodenseite. Wenn man eine große indifferente Elektrode irgendwo am Körper und eine kleine differente Elektrode an die Seite des Kopfes zwischen Auge und Ohr angebracht hatte, so fielen die Tiere nach der unerregten Seite, gleichgültig, ob die differente Elektrode die Anode oder die Kathode war.

Harreveld (1934) dagegen berichtete von guten Ergebnissen mit einer bitemporalen Elektrodenanordnung, welche den Vorzug hatte (gegenüber der Anordnung nach Leduc), daß nur ein geringer Stromanteil den übrigen Organismus durchströmte und somit auch die Komplikationen, die sich durch eine direkte Einwirkung auf das Herz ergeben könnten, ausgeschaltet wurden.

Die beste Narkose, die Gualtierotti (1943) im Anschluß an einen 30 sec dauernden Stromstoß erzielen konnte, wurde erreicht, wenn die Stromstöße direkt mittels Nadelelektroden in die dienzephalische Zone eingebracht wurden. Während der Durchströmung gerieten die Tiere in eine tonische Starre. Nach Beendigung des Stromflußes atmeten die Tiere tief ein. Es wurden keine klonischen Kontraktionen beobachtet, welche auftraten, wenn die Elektroden zu beiden Seiten des Kopfes in der frontalen, temporalen oder occipitalen Region gelegen waren. Eine direkte Durchströmung des motorischen Feldes hatte keine Narkose zur Folge, sondern bewirkte nur Krampfanfälle.

Nach Frostig (1944) ist bei Hunden die Lage der Elektroden am Kopf gleichgültig; die dicke Muskel-und Knochenschicht des Schädels im Verhältnis zum Gehirn gewährleiste eine ziemlich gleichmäßige Stromverteilung im Gehirn unabhängig von der Elektrodenlage. Auch bei Menschen würden sich die Hauptsymptome der

Elektronarkose einstellen, ohne daß der Elektrodenanordnung eine Bedeutung zukomme. Nur leichte Unterschiede stellte Frostig bei den Elektronarkoseversuchen an Menschen mit verschiedenen Elektrodenpositionen fest:
Lagen die Elektroden zu beiden Seiten des Kopfes in einer Linie, die den oberen Orbitalrand mit dem oberen Rand der Ohrmuschel verband, so war die Speichel-und Tränensekretion erhöht. Wenn die Elektroden in Richtung Scheitel verschoben wurden, konnten diese Erscheinungen weitgehend eliminiert werden. Eine frontale Position der Elektroden verursachte eine Pupillenverengerung. Die Pupillen reagierten nicht mehr auf Lichteinfall. Eine occipitale Position rief starke Respirationsbeschwerden hervor. Die günstigste Elektrodenanordnung war eine bitemporale.

Während Anan'ev (1957) empfahl, eine Elektrode auf die Augen zu setzten, damit der Strom leicht ins Schädelinnere eintreten konnte, hielt Smith (1961) diese Anordnung wegen der Gefährdung der Augen für zu riskant.

Wenn die Elektroden im Nacken, statt am Kopf lokalisiert wurden, so wurden an Hunden Herzarrhythmien hervorgerufen, was durch eine Stimulation des Vaguskerngebietes erklärt werden könnte (Hardy, Turner 1961).

Smith (1963) hielt eine Elektrodenanordnung in der Mediansagittallinie des Kopfes für besser als eine bitemporale, welche durch eine direkte Stimulation der darunter gelegenen motorischen Hirnrinde convulsiven Erscheinungen den Vorschub leiste. Der Polarität, d.h. die Richtung des Stromes in der Median-sagittallinie kam nach Ansicht von Smith keine Bedeutung zu.

Von Zichel (1965) wurde deswegen eine fronto-occipitale Elektrodenanordnung der bitemporalen vorgezogen, weil bei letzterer sich eine ungewöhnlich starke Neigung zur Hypersekretion und eine verstärkte Tendenz zu Krämpfen zeigte.

Wood und Powers (1964), die mit einem Sinuswechselstrom mit einer Frequenz von 700 Hz arbeiteten, prüften den Einfluß der

Elektrodenanordnung auf den Blutdruck an Hunden. Lag die eine Elektrode am Ende des harten Gaumens, die andere über dem Sinus frontalis (Position A), so konnte bei einer Stromstärke von 100 mA keine meßbare Änderung des Blutdruckes, außer einer initialen 15 sec dauernden mäßigen Hypertension, beobachtet werden. Wenn die Elektroden etwas nach hinten verschoben wurden, so daß die eine Elektrode am weichen Gaumen, die andere über dem frontalen Teil des Gehirns zu liegen kam (Position B), wurde eine gefährlich starke Blutdrucksteigerung während der gesamten Stromapplikation registriert. Eine weitere Verschiebung der Elektroden nach rückwärts (Position C: Ende des weichen Gaumens - Vertex) hatte dagegen einen mäßigen Blutdruckabfall während des Stromflußes zur Folge. Eine Hypertension, die nicht so stark ausgeprägt war, wie bei Position B, trat auf, wenn die Elektroden noch weiter nach hinten versetzt worden waren (Position D: Oesophaguseingang-Occiput).

C. Die intracranielle Stromverteilung

Als ein sehr wesentliches Problem und weiteren Untersuchungen wert,muß die Frage angesehen werden, wie sich der zugeführte Strom innerhalb der Schädelkapsel verteilt, d.h. welchen Verlauf die Stromlinien nehmen. Diese Stromlinienverteilung ist natürlich abhängig von der Leitfähigkeit der verschiedenartigen Geweben. Exakte Untersuchungen über den Widerstand von den Geweben liegen anscheinend bisher noch nicht vor. Je höher der Elektrolytgehalt eines Gewebes ist, desto leitfähiger ist es.

Da der Strom nach physikalischen Gesetzen den Weg des geringsten Widerstandes wählt, müßte der hauptsächlichste Stromanteil, der sich innerhalb der Schädelkapsel befindet, im Liquor anzutreffen sein. Natürlich ist die Stromverteilung auch von der Lage der Elektroden abhängig.

Giljarowsky (1956) bestätigte die Ergebnisse von einigen früheren russischen Forschern, daß bei einer Augen-Nacken-Elektrodenanordnung sowohl Gleichstrom, als auch Impulsstrom - die für den

Elektroschlaf notwendigen Stromstärken lagen hier bei 10 µA - in das Gehirn eindringt und daß die Stromdichte in den Hirnteilen, die der Basis anliegen, höher ist als in den Gehirnabschnitten, die der Schädelwölbung nahe sind. Der Strom würde bei dieser Elektrodenanordnung durch die dünnen Knochenwände und Öffnungen des Orbitagrundes in den Schädel eintreten und durch die porösen Knochen der Hinterhauptsgegend und möglicherweise durch das foramen occipitale magnum das Schädelinnere wieder verlassen. Dabei würde vorallem das subcorticale Gebiet vom Stromfluß betroffen. Diese Messungen wurden mittels einer Sonde durchgeführt, die aus 2 an den Enden versilberten Nadeln bestand und vollständig mit einem isolierenden Emaillack überzogen war. Diese Sonde wurde durch eine im Schädel trepanierte Öffnung in die Tiefe eingeführt und dabei an verschiedenen Meßpunkten der Spannungsabfall zwischen den beiden Nadelenden bestimmt.

In ähnlichen Untersuchungen konnten Wageneder, Schuy, Genser (1964) an 4 Hunden und von Diemath, Wageneder, Schuy und Genser (1965) während Gehirnoperationen an Menschen nur zeigen, daß der für den Elektroschlaf notwendige Rechteckimpulsstrom (0,6 mA) bei einer Lokalisation der Elektroden an Stirnschädel und Occiput sicherlich ins Gehirn eintritt. Ein zahlenmäßiger Vergleich zwischen den Werten, mit welchen die verschiedenen Gehirnabschnitte durchströmt werden, konnte nicht angegeben werden. Nach Heppner (1965) erreicht der Narkosestrom (Rechteckimpulsstrom) bei einer fronto-occipitalen Elektrodenanordnung vorallem an der Gehirnbasis eine besondere Dichte.

Aus den Arbeiten von Larson (1963, 1964, 1965) und Sances (1963, 1965) über die "evoked potentials" während der Elektronarkose (Elektrodenanordnung: Nasenbein-Protuberantia occipitalis) könnte man schließen, daß die Hirnrinde viel stärker vom Strom beeinträchtigt wird, als etwa das Mesenzephalons oder die Medulla oblongata, da am Cortex während der Elektronarkose keine evoked potentials registriert werden konnten, im Gegensatz zu den basalen Gehirnabschnitten, an welchen noch eine Ableitung

möglich war. Sances (1965) jedoch hatte während der Elektronarkose an Affen sowohl an der Hirnrinde, als auch in den darunterliegenden grauen Hirnkernen eine Stromdichte von etwa 400 mA/cm^2 gemessen. Demnach wäre zur Unterdrückung der evoked poentials in den subcorticalen Hirnzentren eine höhere Stromstärke notwendig als im Cortex.

D. Die Beeinflußung der Elektronarkose durch pharmakologische Mittel

Schon Ranke (1866), Legros, Onimus (1888) und Blasius, Schweizer (1893) stellten fest, daß Strychninkrämpfe durch einen absteigenden galvanischen Strom gedämpft werden.

Scheminzky (1924) entdeckte, daß sich chemische und Galvanonarkose addieren lassen: Chloroform und Äther erniedrigten die Schwellenstromstärken, die zu einer Galvanonarkose erforderlich waren. Die erregende Wirkung des Coffeins dagegen addierte sich zu der des Wechselstromes (Scheminzky 1933).

Auch Kraus und Reiffensstuhl (1933) verhinderten bei Fischen, die mit Strychnin, Pikrotoxin, oder Coffein gespritzt worden waren, Krämpfe, indem er die Tiere mit einem absteigenden galvanischen Strom durchströmte; dagegen wurden die Tiere starr und steif und starben schließlich, wenn sie mit einem Wechselstrom behandelt worden waren.

Desgleichen setzte Adler (1933) durch unterschwellige Dosen von Chloreton, Äthylurethan, Äthylalkohol oder $MgCl_2$ die für die Galvanonarkose bei Fischen notwendige Stromdichte herab. Die Stromdichte für die Galvanotaxis wurde durch die Narkotika nur in geringem Maße verringert, während die Schwellenstromdichte für die erste Reaktion unverändert blieb, auch unter dem Einfluß von Coffein, welches die Schwelle für die Galvanonarkose und die Galvanotaxis anhob. Der relative Spielraum zwischen erster Reaktion und Galvanonarkose wurde durch die Einwirkung von Narkotika kleiner, während Coffein ihn vergrößerte.

In ähnlicher Weise untersuchte Holmes (1946) den Einfluß von Pentothal, Cyclonal, Evipan, Somnifen und Narkonumal auf die Galvanonarkose und fanden auch hier eine synergistische Wirkung. Zusammenfassend kann gesagt werden, daß sich Narkotika, bzw. zentral lähmende Gifte und der absteigende galvanische Strom sich gegenseitig synergistisch beeinflussen, während die Wechselstromnarkose wie auch die Wirkung des aufsteigenden galvanischen Stromes zu diesen Mitteln antagonistisch wirken. Auf der anderen Seite besteht ein Antagonismus zwischen zentralerregenden Stoffen und Galvanonarkose, dagegen ein Synergismus zwischen zentral erregenden Stoffen und Wechselstromnarkose, bzw. der Wirkung des aufsteigenden Gleichstromes. Auf Grund dieser Befunde stellte Scheminzky (1941) die Behauptung auf, daß allein die Galvanonarkose mit einer echten Narkose verglichen werden könne.

E. Über die Produktion von Krampf-oder Schlafstoffen im Zentral- während elektrischer Durchströmung

Kroll berichtete 1933 von Versuchen, bei welchen er aus dem Gehirn von krampfenden Epileptikern und von Tieren, die pharmakologisch oder durch faradische Reizung der Hirnrinde zum Krampfen gebracht worden waren, einen Stoff extrahieren konnte, der bei anderen Tieren, denen dieser Stoff eingespitzt wurde, wiederum Krampfanfälle auszulösen vermochte. Auch behauptete Kroll, daß in den Gehirnen von Tieren, die pharmakologisch (z.B. mit Urethan), physiologisch (Winterschlaf), durch intraventrikuläre Calziuminjektion und physikalisch mit einem Leducstrom (5 mA, Stromflußzeit: 15-20 Minuten, Kathode auf Stirn, Anode über Lendengegend) in einen Schlafzustand versetzt worden waren, während des Schlafes Stoffe entstehen würden, die auf andere Tiere übertragen (intravenös oder suboccipital) bei diesen Schlafbilder wechselnder Intensität bis zur Atemlähmung hervorrufen könnten.

Den Befund, daß während elektrischer Reizung des Zentralnervensystem Krampfstoffe gebildet werden, konnte Holmes (1935) in keiner Weise bestätigen.

Ausgehend von den Versuchen Krolls fand Scheminzky (1938) nach galvanischer Durchströmung in auf-und absteigender Richtung und nach Behandlung mit einem gleichgerichteten Sinuswechselstrom in auf-und absteigender Richtung im Rückenmark von Fröschen einen Erregungsstoff. Wurde diese Substanz in den Lymphsack anderer Frösche eingespitzt, beobachtete man eine Erregbarkeitssteigerung der Tiere und eine Erhöhung der Schwellenstromstärke für die Galvanonarkose. Eine große Elektrode war über dem vorderen oberen Teil, eine kleine Elektrode über dem unteren Teil des Rückenmarkes angebracht. Die größte Wirkung in Bezug auf die Produktion dieses Erregungsstoffes zeigte der absteigende galvanische Strom, die geringste der aufsteigende pulsierende Gleichstrom (Sinuswechselstrom nach Einweggleichrichtung). Ein Sinuswechselstrom vermochte nicht einen Erregungsstoff hervorzubringen. Scheminzky nahm an, daß diese Erregungssubstanz polar unter der Anode gebildet wurde. Bei absteigenden Gleichstrom stellte die große, obere Elektrode die Anode dar; die Anode hatte also in dieser Stromrichtung den größeren Wirkungsbereich als die Kathode. Bei einem pulsierenden Gleichstrom erfolgte die Bildung in Schüben, so daß in der gleichen Zeit weniger produziert werden konnte, als bei kontinuierlichem Gleichstrom. Bei einem Sinuswechselstrom, bei welchem die Polarität ständig wechselt, konnte auch keine Produktion dieses Erregungsstoffes erwartet werden. Da die Bildung dieses Stoffes von der lähmenden oder krampfauslösenden Wirkung des Stromes unabhängig war, konnte nicht von einer Entstehung von Krampf-oder Schlafstoffen im Sinne Krolls gesprochen werden.

IV. Die anatomischen und physiologischen Veränderungen infolge der Elektronarkose

A. Veränderungen am Gehirn

1. Die anatomisch-pathologischen Veränderungen

Übereinstimmende Ergebnisse betreff der anatomisch-pathologischen Veränderungen am Gehirn durch die Elektronarkose konnten nich

erzielt werden. Ein Teil der Forscher (Silver 1941, Gleichstrom, 12 mA, bei Ratten, Narkose über mehrere Stunden; Knutson, 70 Hz-Sinuswechselstrom, 50-100 mA, bei Hunden, Elektronarkose über 3 Stunden), vorallem diejenigen, die in jüngster Zeit ihre Untersuchungen anstellten (Hardy, Turner 1961, 700 Hz-Sinuswechselstrom, 35-40 mA, bei Hunden, Elektronarkose über 2 Stunden; Herin 1963, 700 Hz-Sinuswechselstrom, 25-50 mA, bei Hunden; Smith 1961, 1963, Gleichstrom 20-30 mA, kombiniert mit Rechteckimpulsstrom 100 Hz, 5-45 mA bei Hunden, Elektronarkose über mehrere Stunden) konnten überhaupt keine pathologischen Befunde am Gehirn erheben. Auch elektronenmikroskopische Studien offenbarten keine Schäden im Anschluß an die Elektronarkose (Smith 1965). Andere wiederum beobachteten im wesentlichen am Gefäßsystem mehr oder weniger starke Veränderungen. Wie diese unterschiedlichen Befunde zustande kommen, kann nicht geklärt werden. Daß zum großen Teil die verschiedene Technik eine beträchtliche Rolle spielt, steht außer Frage.

a. Veränderungen am Gefäßsystem

Nach Zeman (1959) entfaltet der elektrische Strom bei Unfällen, die beim Umgang mit dem elektrischen Strom vorkommen, oder beim Blitzschlag am Gehirn seine Wirkung in erster Linie am Gefäßapparat. Dabei können infolge der Kreislaufstörungen neben Blutungen und Ödemen auch Parenchymausfälle durch Anoxie entstehen.

Als erster hatte v. Neergard (1922) nach der Elektronarkose bei histologischen Untersuchungen an einzelnen kleinen Gehirngefäßen Blutaustritte gefunden.

In einer eingehenden Studie untersuchten Jakobi und Magnus (1925) den Einfluß der Elektronarkose auf die Blutzirkulation im Gehirn (Methode: Rechteckimpulsgleichstrom; Frequenz: 2000-10000 Impulse/Minute; Impulsdauer 1-5 msec; Stromstärke: bis 40 mA; Elektrodenanordnung bei Hunden: wie Leduc). Die Gefäße

der Hirnhäute wurden unter einer Elektronarkose durch eine Trepanation des Schädels mittels eines Mikroskopes einer genauen direkten Beobachtung zugänglich gemacht. Schon bei Eröffnung des Schädels demonstrierten eine starke Blutung, die in diesem Ausmaß niemals während einer chemischen Narkose festgestellt worden war und das Abträufeln reichlicher Liquormengen beim Freilegen des Gehirns erhebliche Zirkulationsstörungen. Es entstand regelmäßig ein Hirnödem, welches hauptsächlich dadurch verursacht wurde, daß es infolge der tonischen Anspannung der exspiratorischen Muskelgruppen zu einem Gehirnprolaps, der sich heftig gegen den Schädeldefekt preßte und damit zu Stauungserscheinungen kam. Doch mußte als zusätzlicher Faktor für die Entstehung des Hirnödems eine Gewebsschädigung auf Grund der Elektronarkosebehandlung angenommen werden. Dafür sprachen das Auftreten feiner Liquortröpfchen in freien gefäßlosen Gesichtsfeld, Capillarstasen und ein Stillstand der Blutsäulen auch in größeren Gefäßen. Die unter der Einwirkung der Elektronarkose überproduzierte Lymphe brachte auf der dura mater Lymphspalten und -gefäße zur Darstellung, die sonst nicht sichtbar waren.

Während Ivy und Barry (1931) keine Änderung des Querschnittes der Piagefäße während der Durchströmung beobachteten, stellten Clark und Wall (1934) während des Stromflußes eine Vasokonstriktion der Arterien fest. Wenn der Strom abgeschaltet wurde oder wenn er länger als 10 sec eingeschaltet war, erweiterten sich die Gefäße wieder.

Umfangreiche histologisch-pathologische Veränderungen des Gehirns beobachtete Stief (1933) (Methode: s. unter Kapitel II A 2). Bei Tieren (Kaninchen, Katzen, Meerschweinchen), die durch forcierte Behandlung spontan und sofort ad exitum kamen, fielen vorallem starke Blutungen in den Ventrikel und im Subarachnoidalraum hauptsächlich an der Gehirnbasis und um die Medulla auf. Am Hypothalamus drangen die Blutungen auch in das Nervenparenchym ein. Nirgends waren Gefäßrupturen zu sehen; die Blutungen kamen also per diapedesim zustande. Die Gefäße im Hirn-

stamm, Thalamus, Nucleus caudatus und Hypothalamus waren stark erweitert. Die ektodermalen Gebilde wiesen keine auffallenden Veränderungen auf. - Diejenigen Tiere aber, die nach wiederholten Elektronarkosebehandlungen erst später getötet wurden, hatten folgende Veränderungen: Frische Blutungen waren nur selten, in den Gehirnhäuten waren nur Reste von älteren Blutungen zu sehen. Die Häute waren verdickt und zeigten eine deutliche Bindegewebsproliferation. Die Gefäße waren erweitert. Die perivaskulären Räume waren von einer fibrinösen Masse ausgefüllt. Die Gefäßwände waren nicht verändert. Die Glia behielt ihre ursprüngliche Struktur, mit Ausnahme an den Ventrikelwänden. Die Seitenventrikel wiesen die schwersten Störungen auf: das Ependym war teilweise zerfetzt, teilweise narbig eingezogen; Capillarproliferationen und aus Körnchenzellen bestehende nekrobiotische Reaktionen setzten sich bis tief in das Hirnparenchym fort. Auch im Nucleus caudatus ließen sich schwere Schädigungen erkennen: hochgradige Gefäßdilatation, Gewebsausfälle, deutliche Vermehrung der Gliazellen und perivaskuläre Rundzellinfiltrate. Ähnliche aber weniger ausgeprägte Veränderungen waren im Thalmus und im Hypothalamus zu finden. Im Gebiet des Vestibulariskernes waren starke Glia- und Capillarproliferationen zu sehen.

Bemerkenswert ist auch eine Veröffentlichung von Alpers und Madow (1948) bezüglich der Gefahren, die ein durch das Gehirn geleiteter elektrischer Strom mit sich bringen kann. Es wird von einer Patientin berichtet, die 3 Stunden nach einer Elektronarkosebehandlung, welche freilich eher einer Elektroschockbehandlung entsprach, starb (Methode:50-Hz Sinuswechselstrom; 3 Stromstöße von 10 sec Dauer im Abstand von einer Minute, bitemporale Elektrodenanordnung; Stromstärke: 180 mA). Eine Sektion ergab deutliche frische Blutungen in den subcorticalen Kernen, im Kleinhirn und im Plexus chorioideus der Seitenventrikel. Kleinere, frische Hämorrhagien fanden sich im Cortex, im corpus callosum, im traktus optikus und in den Pinealkörperchen.

Bei 2 von 10 Hunden, die verschieden lange Zeit der Elektronarkose ausgesetzt waren, entdeckte Herin (1963) petechiale Blutungen im Hirngewebe.

Zichel (1965) fand bei seinen histologischen Untersuchungen von Hundehirnen nach einer Elektronarkose (Methode s. unter Kapitel II A 3) eine mäßige bis starke Hyperämie in allen Teilen des Gehirns. Von den vereinzelten frischen capillären Blutungen im Parechym und dem geringen meningealen und submeningealen Ödem an der Großhirnrinde könne aber mit Sicherheit gesagt werden, daß sie nicht auf den Einfluß des elektrischen Stromes zurückzuführen, sondern daß sie in der Agone entstanden seien. Eindeutige Ganglienzellveränderungen konnten nicht mit Sicherheit festgestellt werden.

b. Veränderungen an den Ganglienzellen

Histologische Veränderungen der Ganglienzellen wurden sehr selten beobachtet. Nur Stief (1933) fand vacuoläre und vesikuläre Zelldegenerationsformen und Mutationen der Nisslsubstanz der Nervenzellen im Cortex und Subcortex.

Natürlich kann es sein, daß die möglichen Störungen der Ganglienzellen mit der ziemlich groben histologischen Präparation nur sehr ungenau, bzw. überhaupt nicht erfaßt werden können. Doch könnten die Versuche Scheminzkys (1933), die nur indirekt etwas mit der Elektronarkose zu tun hatten, einen Hinweis dafür liefern, an welcher Stelle und in welcher Art die Nervenzelle geschädigt werden könnte. Es wurde nachgewiesen, daß bei unbefruchteten Forelleneiern ein galvanischer Strom eine polar lokalisierte irreversible Durchlässigkeitssteigerung der Grenzmembranen für Salze hervorbringt. Die Salze traten aus der Eizelle aus, was einen sichtbaren Globulinausfall in der Zelle bewirkte. Dieser Vorgang hatte nichts mit Erregungsvorgängen zu tun, sondern mußte als eine Wirkung des elektrischen Stromes betrachtet werden. Schwächere Ströme verursachten zuerst an der Anode, stärkere Ströme primär an der Kathode einen Globulinausfall. Die Stromstärken lagen etwa in der Größenordnung, welche für eine Galvanonarkose gebraucht wurden. Diese irreversible Permeabilitätssteigerung der Eizellenmembran kann auch durch die üblichen Reizströme (z.B. Wechselstrom, Leducstrom) herbeigeführt werden.

2. Veränderungen der zerebralen Hämodynamik

Zwar haben die im vorhergehenden Kapitel beschriebenen hirnpathologischen Untersuchungen eine Blutüberfüllung des Gehirnes während der elektrischen Durchströmung wahrscheinlich gemacht, doch inwieweit dieser Befund durch eine funktionelle Erforschung der Hirndurchblutung während der Elektronarkose bestätigt werden konnte, soll jetzt erörtert werden.

Zur Messung der Durchblutung des Gehirns wandte v. Harreveld (1943) eine Modifikation des Reinschen Prinzipes an. Durch eine flexible Röhre, welche die zentralen mit den peripheren Stümpfen der durchtrennten Aa. carotides internae verband, wurde der Heizstrom geschickt. Die Aa. thyreoideae, carotides externae und vertebrales wurden unterbunden, so daß allein durch die präparierten Aa. carotides internae das Gehirn mit Blut versorgt wurde. Mit Thermoelementen wurde dann die Temperaturdifferenz des Blutes zwischen einer Stelle vor und einer nach den Heizelektroden gemessen. Dieser Temperaturunterschied ist nun direkt abhängig von der Durchblutung. Es zeigte sich, daß die Durchblutung zunächst genau parallel mit dem Blutdruck ging, nachdem der Narkosestrom eingeschaltet worden war: in den ersten Sekunden ein Abfall, dann ein Anstieg und wieder ein langsames Absinken. Doch verringerte sich der Blutdruck während der Elektronarkose soweit, daß der pränarkotische Wert unterschritten wurde; jedoch die Durchströmung mit Blut blieb während der gesamten Elektronarkosedauer oberhalb des Ausgangswertes. Dies könnte mit den hirnpathologischen Untersuchungen in Übereinstimmung stehen, daß der Narkosestrom die Gehirngefäße erweitert und somit einen erhöhten Blutzustrom zum Gehirn verursacht habe.

Ähnliche Untersuchungen führten Wood und Powers (1964) an Hunden durch, welche mit Pentobarbital narkotisiert wurden und denen eine Stromstärke von 100 mA eines 700 Hz-frequenten Sinuswechselstromes durch das Gehirn geschickt wurde; die Elektroden saßen in Position B (Erklärung s. Kapitel III B). Es wurde die Durchströmung der linken A. carotis interna gemessen,

wobei nur die linke carotis externa unterbunden wurde. Die übrigen Gefäße blieben intakt. Hierbei ergab sich, daß zugleich mit dem Anstieg des allgemeinen Blutdruckes auch die Durchströmung größer wurde.

Die neuesten Untersuchungen über die Veränderungen der zerebralen Hämodynamik während der elektrischen Durchflutung des Gehirnes wurden mit der Rheoenzephalographie durchgeführt. Mit dieser Methode, welche die elektrischen Widerstandsänderungen als Indikator für die Durchblutungsunterschiede benutzt, registrierten Wageneder, Jenkner und Hafner kontinuierlich die Gehirndurchblutung während des Elektroschlafes. Man fand, daß die (Zitat:)".... Veränderungen der zerebralen Hämodynamik während des Elektroschlafes mit jenen, die beim Normalschlaf registriert wurden, identisch waren". Diejenigen Patienten, die elektrisch durchströmt wurden, aber nicht einschliefen, zeigten keine Amplitudenveränderung des REGs; bei Schläfern aber trat eine Amplitudenverminderung, wie im normalen Schlaf ein. Die Durchblutung während des Elektroschlafes sank also ab. Daraus kann natürlich kein Schluß auf die Veränderung der Hirndurchblutung während der Elektronarkose, für die ja viel höhere Stromstärken notwendig sind, gezogen werden.

3. Die Veränderungen des Gehirnstoffwechsels

Um einen Eindruck von dem Verhalten des Gehirnstoffwechsels während der Elektronarkose zu bekommen, hatte v. Harreveld (1943) die arterio-venöse Sauerstoffdifferenz bestimmt. Das Venenblut wurde dem Sinussagittalis entnommen. Die gemessene Verringerung der A-V-Differenz entsprach genau der Erhöhung der Gehirndurchströmung und war längst nicht so deutlich ausgeprägt, wie bei einer Äthernarkose. v. Harreveld schloß daraus daß der Gehirnstoffwechsel, wenn überhaupt, nur ganz geringgradig verändert ist.

Andererseits fand Powers und Wood (1964) eine halbe Stunde nach einer Elektronarkose (700 Hz-Sinuswechselstrom, 100 mA, 16-19 V;

Succinylcholininfusion; künstliche Beatmung) eine Verminderung der O_2-Sättigung des Blutes der vena jugularis um 7-16 %. Da gleichzeitig eine erhöhte Gehirndurchströmung stattfand und der Hämatokritwert erhöht war, vermuteten Powers und Wood, daß der Gehirnstoffwechsel aktiviert worden war. Dafür könne der Anstieg des Adrenalintiters verantwortlich gemacht werden, da King (1952) durch intravenöse Adrenalinapplikation einen Anstieg der Gehirndurchströmung und der Sauerstoffaufnahme hervorgerufen hatte. Noradrenalin hatte nicht den gleichen Effekt.

4. Veränderungen der elektrischen Aktivität des Gehirns

Es ist selbstverständlich, daß die bisher angeführten Untersuchungsmethoden des Gehirns verhältnismäßig grobe Verfahrensweisen sind, mit welchen nur sehr massive Veränderungen festgestellt werden können. Für die Registrierung der möglichen Beeinträchtigung der Ganglienzellfunktion als empfindlichste Methode bietet sich das Elektroenzephalogramm an. Freilich dürfen auch solche Aufzeichnungen nicht überbewertet werden, da ja das EEG nichts über die Funktion der einzelnen Nervenzelle aussagt, sondern nur das statistische elektrische Verhalten im Dentridenapparat der Hirnrinde wiederspiegelt.

a. Das EEG-Verhalten nach elektrischer Durchströmung

1943 berichteten Gualtierotti u. Mitarbeiter über die EEG-Erscheinungen, welche bei Katzen, deren Gehirn mit einem Rechteckimpulsstrom 30 Sekunden lang (genauere Angaben unter Kapitel II B) durchströmt worden war, registriert wurden. Nach einer direkten Durchströmung (mittels Nadelelektroden) des Dienzephalons mit einer Stromstärke von 15-20 mA wurde in allen unterhalb des Zwischenhirnes gelegenen Abschnitten eine Abnahme, manchmal ein Verschwinden der schnellen und langsamen Potentiale beobachtet, solange sich die Tiere in einem unbeweglichen Zustand befanden. Erwachten die Katzen, so erschien auch wieder die elektrische Aktivität. In oberhalb der Durchströmungsstelle gelegenen Gehirnteilen beherrschten langsame Spannungsschwankungen das Bild. Ein ähnliches Verhalten zeigte sich, wenn die Elek-

troden an der Pars occipitalis des Gehirnes lagen, nur war dafür eine stärkere Stromdosis, etwa 30-50 mA nötig. Saßen die Elektroden direkt auf der motorischen Hirnrinde und wurde durch diese ein Strom von 3-4 mA geschickt, wurden nur Krampfanfälle erzeugt; nach der Durchströmung war kein narkoseähnlicher Zustand zu erzielen. Nach einer kurzen Abnahme der elektrischen Aktivität traten langsame Potentiale von großer Amplitude auf, die auch bei epileptischen Anfällen und bei Strychninkrämpfen zu sehen sind. Wurde die sensible Hirnrinde mit 5 mA behandelt, nahm die schnelle Aktivität in der Nähe des durchströmten Gebietes stark zu, was noch nach 24 Stunden wahrnehmbar war. In anderen Hirnabschnitten hatte sich nichts verändert. Eine Kleinhirndurchströmung ließ die elektrische Aktivität zwischen den Elektroden verschwinden. Eine Querdurchflutung des Rückenmarkes hatte eine Aufhebung der Potentiale in den caudal von der gereizten Stelle gelegenen Abschnitten zur Folge. Später erschienen langsame rhythmische Wellen mit einer Frequenz von 4 Hz.

Kerbikov (1955) nahm unmittelbar nach einer Elektroschlafbehandlung (Methode: Rechteckimpulsstrom; Frequenz zwischen 1 und 20 Hz; Impulsdauer : 0,2-0,3 msec; Stromstärke: 5-15 mA; orbito-occipitale Elektrodenanordnung) von Patienten das EEG ab. Es offenbarte sich eine allgemeine Verminderung der elektrischen Aktivität.

Auch Giljarowski (1956) stellte nach der Einwirkung eines Impulsstromes auf das menschliche Gehirn, um einen Elektroschlaf zu erzeugen, eine Depression des Alpharhythmusses fest, zusätzlich eine Erhöhung der hochfrequenten Spannungsschwankungen.

Ähnliche Ergebnisse erhielt Knutson (1956) bei seinen Elektronarkoseversuchen an Menschen. Postelektronarkotisch dominierte ein langsamer Rhythmus von 4-6 Hz mit einer hohen Spannungsamplitude. In einem Fall traten Krampfpotentiale auf.

Smith (1961) beobachtete sofort nach einer Elektronarkose am Hunde-EEG eine Verminderung der Spannungsamplitude um durch-

schnittlich 20 %. Der normale Rhythmus von einer Frequenz von durchschnittlich 28 Hz war schneller geworden; es bestand eine 34 Hz-Aktivität. Diese Veränderungen hatten sich innterhalb von wenigen Minuten, spätestens nach einer halben Stunde wieder normalisiert.

Fabian (1964) registrierte nach einer Elektronarkose an Menschen keine elektroenzephalographischen Veränderungen.

Auch Herin (1964) konnte keine signifikanten Unterschiede zwischen dem prä-und postelektronarkotischen EEG an Hunden feststellen. Eine 2-stündige Einwirkung eines 70 mA-starken 700 Hz-Sinuswechselstromes hatte die Nervenzellfunktion nicht sichtbar geschädigt. Der manchmal auftretende schlafähnliche Rhythmus wurde genauso auch vor Elektronarkosebeginn gefunden.

b. Das EEG-Verhalten während der Elektronarkose

Erst in jüngster Zeit war es gelungen, EEGs während der Elektronarkose aufzuzeichnen. Das diffizile technische Problem, wie man den im Vergleich zu den spontanen elektrischen Spannungsschwankungen sehr starken Narkosestrom bei der EEG-Schreibung eliminieren könnte, wurde gelöst, indem man einen "Low-pass-filter", der nur Ströme in einem niederen Frequenzbereich durchläßt und die Ströme mit höheren Frequenzen abfängt, dem EEG-Eingangskanal vorschaltete.

Mit einem solchen Frequenzfilter registrierte Knutson (1963) an Hunden EEG-Veränderungen während der Elektronarkose (Methode: Sinuswechselstrom; 825 Hz; bitemporale Elektrodenanordnung; Gabe von Atropin und Gallamin) über implantierte Ableiteelektroden. Das normale Hunde-EEG bestand aus einer Mischung von Frequenzen zwischen 5 und 10 Hz. Diesem Rhythmus waren Wellen überlagert, die durch eine Frequenz von 1,5-2 Hz und eine niedrige Spannung charakterisiert waren. Eine Narkosestromstärke von 5 mA hatte noch keinen Einfluß auf das EEG. 15 mA

aber bewirkte einen Abfall der Spannungsamplituden und ein Nachlassen des langsamen Rhythmusses. Bei einer Stromstärke von etwa 35 mA wurde die schnelle Aktivität unterdrückt und es dominierte ein 4-6 Hz Rhythmus. Eine Stromstärke von 50 mA erzeugte einen deutlichen Abfall der Spannungsamplitude; es herrschte ein 10 Hz-Rhythmus vor, welchem eine schnelle Aktivität mit geringer Spannung beigemischt war. Aber nicht bei allen Hunden waren diese Veränderungen festzustellen. 80 Sekunden, nachdem der Strom abgeschaltet worden war, wurde das pränarkotische EEG wieder erreicht.

Auch Geddes (1965) eliminierte mittels eines Filtersystemes den Narkosestrom (700 Hz-Sinuswechselstrom, bitemporale Elektrodenanordnung) aus der EEG-Aufzeichnung. Kaninchen dienten als Versuchstiere. Die 2 Ableiteelektroden wurden über die linke pars frontalis und über die rechte pars occipitalis entweder in den Schädelknochen eingeschraubt oder unter die Haut gelegt. Folgende Befunde wurden erhoben: Wenn eine Stromstärke von 1 mA appliziert wurde, wurden die langsamen Wellen, die für ein ruhendes Tier charakteristisch waren, durch einen niedervoltigen hochfrequenten Rhythmus ersetzt. 20 Sekunden später traten Wellenkomplexe mit einer Frequenz von 5-6 Hz auf. Dieses Wellenbild wurde deutlicher, wenn die Stromstärke auf 1,5 mA erhöht worden war. Nach 2 Minuten erschienen dann 15-20 Hz Wellen. Bei einem weiteren Stromanstieg war eine hochfrequente Aktivität von einer geringen Spannungsamplitude charakteristisch, wobei auch gelegentlich Komplexe von 10 Hz Wellen vorkamen, die immer weniger in Erscheinung traten, wenn der Strom weiterhin verstärkt wurde. Bei 4 mA waren EEG-Wellen von 2-3 Hz vorherrschend, welche von hochfrequenten niedervoltigen Potentialen begleitet wurden. Es traten keine deutlichen Veränderungen mehr auf, wenn die Stromstärke auf 6 mA erhöht wurde. 40 Sekunden nach Stromausschaltung kehrte das ursprüngliche normale EEG wieder zurück. Geddes betonte, daß sich die wesentlichen Veränderungen bei relativ geringen Stromstärken einstellten, bei welchen noch längst keine Narkose für chirurgische Zwecke erreicht war.

In keinem Fall war es also möglich, die EEG-Veränderungen in einen Zusammenhang mit dem Bewußtseinsgrad zu bringen, wie es bei einer chemischen Narkose möglich ist (Bark 1954, Ulile 1954). Im Gegenteil erinnerte das EEG bei Narkosestromstärken, die für chirurgische Zwecke adäquat sind, an solche Aufzeichnungen, die bei munteren Tieren gemacht wurden.

c. "Evoked potentials" während der Elektronarkose

Die durch äußere Reize provozierten Hirnpotentiale (evoked potentials) untersuchte während der Elektronarkose nur ein Forscherteam: Sances, Larson, Jakobs 1963, 1964, 1965). Affen, die mit der oben angegebenen Methode (Kapitel II A 4 b) elektronarkotisiert wurden, waren bipolare Elektroden in den Lemniscus medialis, Nucleus ventralis posterior lateralis des Thalamus, in die Formatio retikularis des Mesenzephalon, auf den Gyrus postzentralis und auf das Stirnhirn implantiert. Wenn der kontralaterale freigelegte N.ischiatikus während der Elektronarkose gereizt wurde, konnte man folgendes beobachten: die "evoked potentials" verschwanden in der Ableitung am Gyrus postcentralis völlig. In der Aufzeichnung der Reizantworten im Thalamus hatte die Amplitude um 50 % abgenommen. In der Ableitung vom Lemniscus medialis war die Amplitude um 15 % verringert. Wenn die Formatio reticularis des Mesenzephalon stimuliert wurde, verschwanden während der Elektronarkose die "evoked potentials of long latency", d.h. die provozierten Rindenpotentiale mit einer langen Latenzzeit, die unter normalen Umständen vom Stirnhirn abgeleitet werden konnten.

5. Die Veränderung der Reizschwelle der motorischen Hirnrinde während der Elektronarkose

Larson, Sances und Jakobs (1964) und Sances (1965) untersuchten auch die Erregbarkeitsveränderungen der motorischen Hirnrinde während der Elektronarkose. Die Versuche, bei welchen durch Stimulation der motorischen Hirnrinde und der Hirnschenkel Bewegungen der Extremitäten hervorgerufen wurden,

zeigten, daß die Reizschwelle an der motorischen Hirnrinde stark durch die Elektronarkose angehoben worden war, während an den Hirnschenkeln ein weniger deutlicher Anstieg der Reizschwelle zu verzeichnen war. Innerhalb von 5 Minuten nach Stromunterbrechung waren die normalen Verhältnisse wieder hergestellt.

B. Veränderungen des Kreislaufes und der Herzfunktion

1. Der Blutdruck

Schon Leduc (1911) wies darauf hin, daß nach anfänglichen Schwankungen - zuerst eine leichte Erhöhung, gefolgt von einer deutlichen Verminderung - der Blutdruck während der gesamten Elektronarkosedauer erhöht ist, gleichgültig, ob die initiale Stromapplikation langsam oder abrupt erfolgte.

Harreveld und Dandliker (1945) hatten das Blutdruckverhalten während der Elektronarkose (Methode s. bei Harreveld Kapitel II A 3) sorgfältig studiert. Es kam bei den hohen anfänglichen Stromstärken zu einer Blutdrucksenkung infolge eines Herzstillstandes, welcher durch eine Vagusstimulation verursacht worden war. Während des Narkosestadiums stieg dann der Blutdruck beträchtlich über die pränarkotischen Werte an. Wenn die beiden n. vagi vorher durchtrennt worden waren, kam es sofort zu einem RR-Anstieg. Doch im weiteren Verlauf sank der Blutdruck unter die Normalwerte, auch wenn die n. vagi intakt geblieben waren. Nach einiger Zeit aber erfolgte eine zweite RR-Zunahme. Durch eine Erschöpfung des Sympathikuszentrums, welches sich nach einiger Zeit wieder erholte, könnte die vorübergehende RR-Senkung erklärt werden.

Humorale Mechanismen waren nach Harreveld an der Blutdrucksteigerung nicht beteiligt, weil bei einem Tier, dessen Kreislauf über die a. carotis und v. jugularis mit einem anderen unter Elektronarkose stehenden Tier verbunden worden war, eine RR-Erhöhung nicht induziert werden konnte.

Knutson (1956), der während seiner Elektronarkoseversuche Atropin (Vagolytikum !) verabreicht hatte, registrierte zunächst einen Blutdruckanstieg um 30-40 mmHg. Innerhalb einer Stunde wurde jedoch der Blutdruck wieder geringer, blieb aber während des Stromflußes immer 10 mmHg über dem Normalwert.

Ähnliche Ergebnisse erzielten Hardy und Turner (1961). Daß der Sympathikus bei der Hypertension eine große Rolle spielt, wurde dadurch bewiesen, daß total sympathektomierte Hunde keine und mit Phentolamin gespritzte Tiere nur eine geringe Blutdruckerhöhung aufwiesen.

Herin (1963) fand bei Hunden eine Anhebung des durchschnittlichen Blutdruckes von 142 mmHg auf 217 mmHg.

Eine 5-20 %ige Erhöhung des systolischen und eine 11-50 %ige Steigerung des diastolischen Blutdruckes beobachtete Smith (1964). Nur bei einem Hund fiel der diastolische Blutdruck um 25 % ab.

Auf die Bedeutung der Elektrodenanordnung für den Blutdruck wurde schon weiter oben (Kapitel III B 4, Wood, Powers 1964) hingewiesen. Außerdem wurde von Wood und Powers betont, daß im Gegensatz zu einer schnellen (10 mA in 10 sec) eine langsame (10 mA in 60 sec) Stromsteigerung bis zu einer Stromstärke von 140 mA keine Alteration des Blutdruckes verursachte.

Die Frage, welchen relativen Anteil die Nebennieren, das Herz und das Gefäßsystem an der durch die Elektronarkose verursachte Hypertension hat, wurde von Powers und Wood (1964) einer genauen Analyse unterzogen. Es wurden nacheinander die Nebennieren (durch Extirpation), die inotrope und chronotrope Beeinflußung des Herzens durch den Sympathikus (durch Dichloroisoproterenol) und die mögliche periphere Gefäßkontraktion (durch Phentolamin) ausgeschaltet. Es ergaben sich folgende Werte:

vor Elektronarkose	während Elektronarkose	Präparation der Tiere
175/125	375/225	ohne jede Blockade
140/100	225/150	Exstirpation der Nebennieren
90/50	160/110	Blockade der sympathischen Herzreaktion
60/50	70/50	Blockade der Vasokonstriktion

Diese Ergebnisse zeigen eindeutig, daß die Hypertension nicht durch die Vasokonstriktion, sondern durch die Nebennierenhormone und das erhöhte Herzminutenvolumen bedingt ist.

Andere Forscher wiederum sahen keine wesentlichen Änderungen des Blutdruckes (Zichel 1965). In den Versuchen von Anan'ev (1957) verhielt sich der RR normal und fluktuierte systolisch um 5-10 mmHg. Auch bei Wageneders (1965) Experimenten blieb der Blutdruck annähernd konstant, was als ein Vorzug des von ihm patentierten Narkosegerätes, welches ein Breitbandrauschen erzeugte, angesehen wurde.

2. Puls, Herzrhythmus

Schon Bikeles und Zbyszewsky (1920) wiesen auf die starke Vagusstimulation, die sich in einem Herzstillstand und nachfolgender langsamer Herzfrequenz äußerte, infolge der elektrischen Durchströmung des Zentralnervensystems hin (Methode: 60 Hz-Sinuswechselstrom; Stromstärke: 75 mA; Reizdauer 60 sec; Elektrodenanordnung beim Hund: Nacken - Gaumen).

Frostig (1944) beobachtete während der Elektronarkose nach der Methode von Harreveld im Anschluß an einen vagusbedingten Herzstillstand eine Verlangsamung der Herzfrequenz, welche im weiteren Verlauf der Elektronarkose ganz beträchtlich über die pränarkotischen Werte zunahm.

Knutson (1956) schaltete während der elektrischen Hirndurch-

strömung aufgetretenen Bradycardie und Herzarrhythmie durch Atropin und Gallamin-Gabe aus.

Auch Hardy und Turner (1961) vermieden durch Atropinapplikationen arrhythmische Herzaktionen. Bei den atropinisierten Hunden aber erhöhte sich die Pulsfrequenz von 110/min auf 160/min innerhalb von 2 Stunden Elektronarkose. Dann verringerte sich die Frequenz langsam wieder innerhalb der nächsten 5 Stunden auf 120/min.

Nach Wood und Powers (1964) erzeugte eine plötzliche Zufuhr von 100 mA Wechselstrom einen sofortigen (vagusbedingten) Herzstillstand. Im weiteren Verlauf der Elektronarkose kamen vagusbedingte Extrasystolen vor. Ansonsten schlug das Herz langsam und regelmäßig. Wenn der Strom abgeschaltet wurde, setzte eine erhöhte Pulsfrequenz und ein regelmäßiger Herzrhythmus ein. Bemerkenswert ist, daß trotz des erhöhten Vagotonus der Blutdruck stark angestiegen und die Herzkontraktionskraft verdoppelt war.

Bradyarrhythmische Herzaktionen traten bei den Versuchen von Zichel (1965) nur dann auf, wenn die Stromstärke geändert wurde. Wenn ein konstanter Wert eingehalten aber der Strom abgeschaltet wurde, waren keine Herzarrhythmien mehr zu beobachten.

3. Elektrokardiogramm

Anan'ev (1957) und Gowing (1964), der die Smithsche Elektronarkosetechnik anwandte, fanden während der Elektronarkose am EKG keine Abweichungen von der normalen Herzaktivität. Nur in Fällen, in welchen die Excitationsphase deutlich ausgeprägt war, registrierte Anan'ev eine erhöhte Erregbarkeit des Herzmuskels, welche sich in einer Verkürzung des P - P Intervalls und einem verkürzten Kammerkomplex äußerte. Gowing beobachtete selten einen vorzeitigen Kammerschlag.

C. Veränderung der Atmung

1. Atemrhythmus, Atemmechanik, Minutenvolumen

Leduc (1911) berichtete, daß die Spannung, mit welcher man die Elektronarkose aufrecht erhielt, bedeutend überschritten werden mußte, wenn man die Respiration aufheben wollte. Bei der Spannungserhöhung waren zunächst die Atembewegungen beschleunigt und vertieft; allmählich wurde sie unregelmäßig; der Thorax dehnte sich zuweilen bis zum äußersten Grad der Ausdehnungsfähigkeit; die Bewegungen wurden immer oberflächlicher und setzten manchmal aus; schließlich blieb der Thorax in einer Stellung zwischen Exspiration und Inspiration stehen.

Eine Atmungshemmung beobachteten Bikeles und Zbyszewsky (1920), wenn das ZNS eines Hundes 30 Sekunden lang mit 70 mA eines 60 Hz-Sinuswechselstromes über eine Gaumen-und Nackenelektrode stimuliert worden war.

Nach v. Neergard (1922) ist die Atmung während der Elektronarkose stark behindert. Es wurde vermutet, daß ein Glottiskrampf und ein Krampf der gesamten Atemmuskulatur bestand. Als Folge davon stellten sich Stauungen des Pfortaderkreislaufes, sowie Blutungen im Lungenparenchym ein. Die beobachtete Atmungsform wurde als Pressatmung bezeichnet.

Die Hauptursache für den Tod während der Elektronarkose ist nach Sack und Koch (1933) die Erstickung, die als Folge der tetanisierten Atemmuskulatur eintrat.

Um eine genügende Sauerstoffzufuhr zu gewährleisten, intubierten Knutson (1954,1956) und das Team um Hardy und Fabian endotracheal. Durch die Kontraktionen der gesamten Körpermuskulatur war die Atmung so stark behindert, daß Hardy und Fabian die Atmung mit Hilfe von Muskelrelaxantien und künstlicher Beatmung unter Kontrolle brachten.

Smith (1964) stellte bei endotracheal intubierten Hunden keine verminderte Respirationsluft fest. Das verkleinerte Minuten-Volumen war die Folge einer verlangsamten Atemfrequenz, welche der von ruhenden Tieren entsprach. Später begannen die Hunde zu hecheln, da wegen der Intubation die Wärmeabgabe über die Zunge behindert war und infolgedessen die Körpertemperatur beträchtlich anstieg.

Nach McIntyre (1964) war zu Beginn der Elektronarkose die Atemfrequenz und die Atemtiefe erhöht und die Exspiration erschwert; nach einiger Zeit wurde die Atmung langsamer (6-10/min), die Respirationsluft blieb erhöht; die Atembewegungen erfolgten relativ mühelos. Wenn die Impulsbreite des Narkosestromes auf 1 msec verkürzt wurde, wurde die Atmung stertorös. Bei Eintritt der Anästhesie atmeten die Tiere unter Kraftanstrengung, wobei es schwierig war, das eine ohne das andere zu erreichen.

Zichel (1965) beobachtete, daß eine ausreichende Ventilation stattfand, obwohl die Atmung nach anfänglicher Depression allmählich verkrampft wurde. In manchen Fällen wurde auch ein Atemstillstand festgestellt.

2. Sauerstoff-und Kohlendioxydaustausch; Respiratorischer Quotient

Den Einfluß der "Smithschen" Elektronarkose auf Kaninchen (Stromstärke 0,6 mA; Spannung: 50 Volt; bitemporale Elektrodenanordnung) auf den O_2-Verbrauch und auf die CO_2-Abgabe durch die Lunge ermittelten Strimska und Vacek (1960). Es wurde eine deutliche Erhöhung des O_2-Verbrauches gemessen, welcher sein Maximum (50 %iger Anstieg gegenüber den pränarkotischen Werten) nach 20 Minuten erreicht hatte. 10 Minuten später war der O_2-Verbrauch noch um 20 % erhöht. Wenn der Strom abgeschaltet wurde, sank die Kurve abrupt ab. Für diesen Befund wurde die erhöhte Muskelaktivität, vorallem zu Beginn der Elektronarkose verantwortlich gemacht. - Die Kurve der CO_2-

Abgabe zeigte einen schnelleren Anstieg als die des O_2-Verbrauches. Hier aber erfolgte nach Beendigung der Elektronarkose ein abermaliger Anstieg. Dieses Ergebnis spricht wie der erhöhte O_2-Verbrauch für einen erhöhten Muskelstoffwechsel. Die Kurve des respiratorischen Quotienten verlief ähnlich wie die der CO_2-Abgabe. Eine Sauerstoffschuld wurde also nicht eingegangen.

Mc Intyre (1964) hatte bei seinen Elektronarkoseversuchen einen um 20-100%ig vergrößerten Sauerstoffverbrauch gemessen, im Vergleich zu den Tieren, die unter dem Einfluß von Thiopenton standen.

3. Sauerstoff-und Kohlendiocydgehalt im Blut.

Schon Fleisch (nach v. Neergard 1922) stellte fest, daß während der leducschen Elektronarkose bei tracheotomierten Hunden die Atmung nicht insuffizient wurde, daß das Blut sich sogar mit Sauerstoff anreicherte. Das CO_2 im Blut war nicht vermehrt, es war sogar vermindert. Die durch die starken Muskelkontraktionen gebildete Milchsäure war nach Fleisch verantwortlich für die vermehrte CO_2-Abgabe.

Dazu paßt der Befund Frostigs (1944), daß während der Elektronarkose die CO_2-Bindungskraft, die Alkalireserve durch die Freisetzung von Milchsäure infolge der heftigen Muskelaktivität beträchtlich vermindert ist.

Hardy und Turner (1961) waren der Ansicht, daß der Abfall des CO_2-Wertes im Blut während einer 8-stündigen Elektronarkose von 35 Vol% auf 25 Vol% durch die von Seiten der künstlichen Beatmung bedingte Hyperventilation verursacht wurde. Der O_2-Gehalt war angestiegen, auch infolge der Curarisierung und der künstlichen Beatmung.

Auch Smith (1964) konnte bestätigen, daß während der Elektronarkose eine ausreichende Atmung erfolgte, da die arterielle O_2-Sättigung nicht unter 91 % fiel und die arterielle CO_2-Spannung nicht die normalen Werte überstieg.

D. Veränderungen des Blutes

1. Geformte Bestandteile

Des öfteren wurde eine deutliche Vermehrung der corpuskulären Bestandteile des Blutes gefunden. Frostig (1944) stellte bei seinen elektronarkotisierten Hunden eine erhebliche Erhöhung der Zahl der roten und weißen Blutkörperchen um etwa 3-48 % gegenüber den unbehandelten Tieren fest. Nach der Ansicht Frostigs kam dies erstens dadurch zustande, daß dem Plasma Wasser entzogen wurde, was an der Vermehrung des Plasmatrockengewichtes um etwa 0,4-6,5 % zu ersehen war. Zweitens dadurch, daß durch die starke Reizung des Sympathikus die Milz, welche für den Hund das hauptsächliche Blutreservoir darstellt, kontrahiert wurde und somit der zirkulierenden Blutmenge noch zusätzlich Blutkörperchen hinzugefügt wurden.

Dieser Befund wurde von Powers und Wood (1964) bestätigt, die eine durchschnittliche Erhöhung des Hämatokrites von 40 % bei normalen auf etwa 55 % der mit Elektronarkose behandelten Hunde gemessen hatten; wenn aber die Milz exstirpiert worden war, dann erfolgte keine Steigerung des Hämatokrites.

Nach Anan'ev (1957) sollen nach einer 2-stündigen Elektronarkose die weißen Blutkörperchen um 2000-8000 vermehrt worden und eine Linksverschiebung der Leukozyten eingetreten sein.

Short (1965) fand einen deutlichen Anstieg der neutrophilen Leukozyten und eine Abnahme der Lymphozyten und eosinophilen Leukozyten.

2. Blutzucker

Während Anan'ev nur bei 9 von 19 Experimenten an Hunden eine Erhöhung des Blutzuckers, der sich nach 45 Minuten Elektronarkose wieder normalisierte und 5 Minuten nach Stromöffnung in 10 von 12 Fällen um 59-88 mg% absank, fanden andere eine regelmäßige Anhebung des Blutzuckerspiegels.

Bei den Versuchen Frostigs (1944) stieg der Blutzucker oft um mehr als das Doppelte während der Elektronarkose an, was durch eine Stimulation des sympathischen Nervensystems erklärt werden könne.

Auch Knutson (1956) stellte nach einer 15 Minuten dauernden Elektronarkose des öfteren ein hyperglykämisches Maximum fest. In anderen Fällen wurde das Maximum erst nach 1,2 oder 3 Stunden erreicht. Wenn der Strom abgeschaltet wurde, fiel der Blutzucker innerhalb einer Stunde ganz deutlich wieder ab.

Nach Hardy und Turner (1961) verlief die Blutzuckerkurve bei Hunden während einer 7-stündigen Elektronarkose folgendermaßen: Beträchtlicher Anstieg innerhalb der ersten 15 Minuten, nach 3 Stunden wieder allmähliches Absinken, um nach 7 Stunden wieder auf den normalen Wert zu kommen, wobei sich der Leberzucker erschöpft haben könne.

Nach Smith (1964) würden die Blutzuckerwerte von Hunden während der Elektronarkose differieren, doch war fast immer ein Anstieg zu verzeichnen. Man beobachtete einen Anstieg um 5-225 mg%, also eine 5-150 %ige Erhöhung gegenüber nicht behandelten Tieren.

3. Fermente

Smith (1965) diagnostizierte bei allen Tieren auf Grund einer vorübergehenden Erhöhung der SGOT, SGPT und LDH (Spitze 4, 5 im LDH-iso-Test) einen geringen hypoxischen Myokardschaden und

eine vorübergehende hypoxische Schädigung der Leber (Spitze 1 im LDH-iso-Test).

E. Veränderungen der endokrinen Drüsen

1. Schilddrüse

Ellis und Wiersma (1945) hatten an Meerschweinchen den Einfluß der Elektronarkose (Methode nach Harreveld; in den ersten 30 sec 50 mA, für das Narkosestadium: 7 mA; 10 malige Behandlung, 2 Stunden täglich) auf die Schilddrüse geprüft. Es stellte sich heraus, daß die Schilddrüse gegenüber der von unbehandelten Tieren um 15 % schwerer geworden ist. Das Epithel der Acini hatte sich von 5,5 auf 8,1 verdickt. Je länger die Elektronarkosebehandlung fortgesetzt wurde, desto mehr nahm das Epithel an Höhe zu. Bei Hunden wurden ähnliche Ergebnisse erzielt. Zusätzlich wurde bei diesen ein erhöhter Gehalt an Tyroxin gemessen. Für solche Veränderungen benötigten die Hunde nur eine längere Behandlung.

2. Nebennieren

Ellis und Wiersma fanden auch, daß die Nebennieren um 25-30 % durch die wiederholten Elektronarkosen schwerer geworden sind.

Einen entsprechenden Befund erhoben McNeil, Turner (1959), Hardy, Turner (1861), Fabian, Hardy (1961), die einen deutlichen Anstieg der freien Hydroxycorticosteroide im Plasma verzeichneten. Das Blut wurde direkt der Hauptvene der Nebenniere entnommen.

Auch der Adrenalinspiegel war nach einer halben Stunde deutlich erhöht, um dann wieder allmählich abzufallen. Die Kurve der Noradrenalinkonzentration im Blut verlief zu Beginn der Elektronarkose sehr steil nach aufwärts, hatte nach 1 1/2 Stunden ihr Maximum erreicht und fiel dann wieder ab. Desgleichen stellte Loucas (1965) einen Anstieg des Adrenalinspiegels im Blute (bis zu 100 %) fest.

Die Annahme liegt nahe, daß diese erhöhte Hormonaktivität ihre

Ursache in der Stimulation des Hypothalamus-Hypophysensystems hat, zumal auch die Ovarien nach Ellis und Wiersma eine beträchtliche Gewichtszunahme erfahren. Der Organismus, der einer Elektronarkose ausgesetzt ist, befindet sich offensichtlich in einer Stress-Situation. Während einer normalen chemischen Narkose dagegen war eine derartige Anregung des endokrinen Systems niemals beobachtet worden.

F. Veränderung der Nierenfunktion

1. Harnstoffspiegel im Blut

Nur Knutson (1956) hatte eine leichte bei statistischer Analyse signifikante Zunahme des Harnstoffes im Blutserum festgestellt - ein Befund, der als verminderte Nierenfunktion gedeutet wurde.

2. Clearance

McIntyre (1964) führte an 3 unter Elektronarkose stehenden Hunden eine Kreatinin-Clearance durch: in 2 Fällen wurde eine Erhöhung (von 17,6 auf 21,5 ml/min und von 15,2 auf 34,6 ml/min), in einem Fall eine Verminderung (von 27,8 auf 20 ml/min) des Glomerulumfiltrates gemessen.

G. Einfluß auf die Schwangerschaft

Während Robinowitsch (1910) bei elektronarkotisierten schwangeren Hündinnen innerhalb eines Zeitraumes von wenigen Stunden bis zu einem Tag nach dem Experiment Aborte beobachtet hatte, kamen bei den Versuchen von Smith (1964) auch nach einer 6-stündigen Elektronarkosedauer keine Aborte vor: es wurden normale Junge geboren.

Auch bei Shorts-Versuchen (1965) traten infolge der Elektronarkose keine Aborte auf.

V. Theorien der Elektronarkose

Obwohl man sich schon fast ein ganzes Jahrhundert mit dem Problem der Elektronarkose befaßt, ist es bisher noch in keiner Weise gelungen. die zu Grunde liegenden Wirkungsmechanismen aufzudecken. Einige bedeutungsvolle Theorien sollen in diesem Kapitel erwähnt werden.

A. Die polarisierende Wirkung des elektrischen Stromes

1. Hyperpolarisation bei galvanischen Strömen

Scheminzky (1941) nahm an, daß bei der Galvanonarkose im ZNS elektrotonische Erscheinungen, ähnlich wie bei der Beeinflußung des peripheren Nerven mit einem Gleichstrom, vorliegen. Erregbarkeitsuntersuchungen hatten gezeigt, daß im ZNS der Wirbeltiere eine funktionelle Polarität besteht, d.h. daß die einzelnen nervösen Elemente etwa wie bei einem Stabmagneten ausgerichtet seien. Bei absteigender Stromrichtung würde am Axonpol der zentralen Ganglienzellen ein Anelektrotonus entstehen, so daß das Ausfließen von Erregungen aus dem Gehirn gehemmt sei (Galvanonarkose). Die umgekehrte aufsteigende Stromrichtung würde durch den sich entwickelnden Katelektrotonus die Erregbarkeitsschwelle im Gehirn vermindern (Galvanischer Krampf).

Ein interessantes Phänomen entdeckte Burge (1940, 1948), nämlich, daß die Hirnrinde gegenüber der Peripherie (z. B. Sacrum oder Vorderarm) ein negatives Spannungspotential besitzt, welches bei sportlichen Übungen erhöht werde, aber im Schlaf oder in chemischer Narkose zur elektropositiven Seite hin verschoben werde. Burge zog den Schluß, daß das Bewußtsein von dem elektrischen Gleichstrompotential der Hirnrinde abhängig sei: das aktive bewußte Hirn ist elektronegativ, das inaktive narkotisierte Gehirn dagegen elektropositiv gegenüber der Peripherie. Durch Anlegen eines Gleichstromes könne das Gehirn positiv und somit bewußtlos gemacht werden.

2. Depolarisation bei den Reizströmen

Nach neueren Untersuchungen (Caspers 1959) stellt das EEG eine Amplitudenmodulation der corticalen Gleichspannungskomponente dar. Im Schlaf und in der Narkose (chemische) ist diese Gleichspannung weniger elektronegativ als im Wachzustand oder gar während Krampfzuständen (gegenüber einem indifferenten Bezugspunkt, z.B. Nasenspitze), in welchen die Gleichspannung sehr stark negativ ist (s. auch Burge). Caspers hat nun gezeigt, daß durch die direkte Reizung eines Cortexabschnittes mit einem Impulsstrom der stimulierte Teil polarisiert, d.h. negativiert wurde. Es könnte nun daran gedacht werden, daß der Impulsstrom, der während der Elektronarkose dem Gehirn von außen zugeführt wird, eine negative Polarisierung bewirkt, welche dann wie im Krampfzustand eine Bewußtseinstrübung verursacht. Krampfanfälle tonischer und klonischer Art unterschiedlicher Stärke wurden ja des öfteren auch beobachtet. Eine eingehende Untersuchung der corticalen Gleichspannungskomponente während der Elektronarkose wäre empfehlenswert.

B. Erschöpfung des ZNS

v. Harreveld (1942) betonte, daß die wesentlichste Wirkung des Stromes bei der Elektronarkose die Stimulation des ZNS sei. Auf Grund der Beobachtung, daß der Betäubung durch Reizströme ein Stadium beträchtlicher Erregung vorausgehe, müsse nach Scheminzky (1933) und Adler (1938) an eine Ermüdung oder Erschöpfung des ZNS auf Grund der lang andauernden Reizung gedacht werden, wodurch eine Reaktionslosigkeit auf Schmerzreize eintrete. Doch dagegen spricht der nur ganz geringgradige veränderte Hirnstoffwechsel (s. Kapitel IV A 3). Freilich liegen darüber viel zu wenig Untersuchungen vor, als daß endgültige Aussagen gemacht werden könnten.

C. Ausschaltung der Integrations-und Assoziationsfähigkeit des [illegible]

Während Leduc annahm, daß bei der Elektronarkose die höheren

Zentren ausgeschaltet oder außer Funktion gesetzt werden, daß also ein wirklicher Reizzustand nicht vorliegt, dachte Boruttau und Mann (1911) eher (Zitat:)"... an eine so starke Erregung sämtlicher nervöser Zentra, daß jede Assoziationserregung gegenüber der exogenen Erregung unterschwellig bleibt." Diese Meinung, daß der sehr starke Narkosestrom die feinen spontanen Spannungspotentiale des Gehirns "niederknüppele" und somit eine Schmerzperzeption unmöglich mache, werden durch die Befunde Wagenedersund Mitarbeiter (1964) untermauert, welche zeigten, daß der sogar während eines Elektroschlafes, bei welchem viel geringere Stromstärken als bei der Elektronarkose benützt werden, registrierte Spannungsabfall 10000 mal größer ist, als die von den EEG-Tiefenableitungen her bekannten Eigenspannungen des Thalamus.

D. Erregung von Hemmungszentren

Die Versuche von Hess (1931), der mittels haarfeiner Elektroden Kerne der Gehirnbasis elektrisch reizte und dadurch unter anderem Schlaf erzeugte und von Gualtierotti (1943), der durch direkte Stimulation des Mesenzephalon die beste Betäubung ohne krampfartige Nebenerscheinungen bekam, legen auch die Vermutung (Harreveld 1942) nahe, daß während der Elektronarkose unter anderem gewisse Hemmungszentren stimuliert werden würden, so daß ein Bild der Unerregbarkeit in Erscheinung trete.

E. Entstehung von nicht lokalisierten Hemmungsmechanismen

Der Theorie von bestimmten Hemmungszentren widersprachen vorallem die russischen Forscher, die sich alle von den Gedanken Wedenskis und Pavlows leiten ließen.

1. Parabiose nach Wedenski

(Zitat aus Bykov:) "Der Hemmungsprozeß entsteht immer im Zusammenhang mit dem Erregungsprozeß und untrennbar von der Er-

regung". Nach jedem Erregungsimpuls entsteht in den erregbaren Gebilden eine Refraktärphase, von welcher die maximale Anzahl reizsynchroner Reaktionen abhängig ist. Wenn die absolute Refraktärphase 1 msec dauert, liegt dieses Maximum bei 1000 Hz (z.B. für den peripheren Nerven des Warmblüters; für den peripheren Nerven der Kaltblüter liegt es bei 500 Hz). Durch diese Werte ist der von Wedenski geprägte Begriff der funktionellen Beweglichkeit oder Labilität charakterisiert. Nach Wedenski wird diese Labilität z. B. des Nerven durch exogene physikalische Einflüße wie starke elektrische Ströme, Erwärmung, mechanischer Druck u.s.w. immer geringer, bis nach Durchlaufen einiger Zwischenstadien ein vollständiger Leitungsblock eintritt. Dieser Zustand, der durch die langandauernde Wirkung z.B. des elektrischen Stromes erzeugt wird und eine lokal begrenzte vertiefte Erregung mit Verlust der Ausbreitungsfähigkeit darstellt, wurde von Wedenski "Parabiose" genannt. Die parabiotische Hemmung ist also ein modifizierter Erregungsprozeß. Bei voller Entwicklung dieser Parabiose hat das Gewebe reversibel seine funktionellen Eigenschaften, wie Erregbarkeit und Leitfähigkeit,verloren und ist somit gegenüber neuen Reizen refraktär. So glaubte Anan'ev, daß die Elektronarkose parabiotischer Natur sei, d.h. daß das Gehirn durch langandauernde elektrische Reizung gegenüber anderen, z. B. Schmerzreizen refraktär geworden ist.

2. Überlastungshemmung nach Pavlow.

Nach Pavlow entsteht die Überlastungshemmung auf Grund von starken oder häufigen, bzw. anhaltenden Reizen vorallem in der Großhirnrinde und kann über die ganze Hirnrinde irradiieren. Sie sei nicht identisch mit der Ermüdung, sondern spiele die Rolle einer Schutzvorrichtung der Zelle, die einen weiteren, übermäßigen und gefährlichen Abnutzung der Zelle vorbeugen soll. Durch eine solche über das ganze Gehirn irradiierte Überlastungshemmung könne nach Giljarowsky die Elektronarkose erklärt werden.

E X P E R I M E N T E L L E R T E I L

I. Aufgabenstellung

a. In 29 Versuchen an 7 Hunden sollte die Wirkung des mit Gleichstrom überlagerten Rechteckimpulswechselstromes und des Sinuswechselstromes untersucht und geprüft werden, inwieweit mit dem elektrischen Strom allein eine Narkose zu erzeugen ist.

b. Des weiteren sollte die Auswirkung der Elektrodenplazierung auf die Elektronarkose geklärt werden.

c. Auch interessierte uns, ob der Strom bei fronto-occipitaler Elektrodenanordnung überhaupt ins Schädelinnere eindringt und welcher Stromanteil extrakraniell verloren geht.

In diesem Zusammenhang war auch die Frage von Wichtigkeit, welche Relation zwischen der Spontanaktivität des Gehirns und der vom Narkosestrom hervorgerufenen Stromstößen im Gehirn besteht.

II. Methodik

a. Elektronarkosegerät nach Smith, zur Erzeugung einer kombinierten Spannungsform mit rechteckförmiger Wechselspannung und Gleichstromgrundpegel.

Smith (115-125) verwendete, ausgehend von den Versuchen von Anan'ev (4), zur Elektronarkose eine Spannungsform, die durch Überlagerung aus einer rechteckförmigen Wechselspannung und einer Gleichspannung entsteht.

Beide Stromarten werden zunächst getrennt erzeugt. Es resultiert ein Spannungsverlauf, welcher im wesentlichen einem Leducstrom (Rechteckimpuls-Gleichstrom) mit einem Gleichspannungsgrundpegel entspricht (Abb. 1).

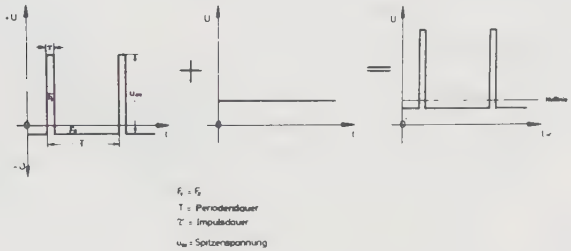


Abb. 1: Stromform, bzw. Spannungsverlauf bei der Elektronarkose nach der Methodik von Smith; zusammengesetzt aus einem Rechteckimpulswechselstrom und einem Gleichstrom.

Beide Spannungsarten können unabhängig voneinander geregelt werden. Bei der Rechteckwechselspannung lassen sich die Spitzenspannung u_{ss}, die Periodendauer T, bzw. die Frequenz f

und die Impulsdauer τ , bei der Gleichspannung die Intensität kontinuierlich verändern.

Die Rechteckimpulswechselspannung wird mit einem Generator erzeugt, der aus den Baugruppen Sägezahngenerator, Impulsformer und Kathodenverstärker besteht (Abb. 2). Diese Anordnung wurde gewählt, um bei der Einstellung a f die gewünschten Werte eine gegenseitige Beeinflussung von Schwingungsdauer, Impulsdauer und Spitzenspannung zu verhindern. Die einzelnen Baugruppen erhalten vom Netzteil die erforderliche Betriebsspannung (Anoden- und Heizspannung). Zusätzlich wird im Netzteil die zur Elektronarkose erforderliche Gleichspannung erzeugt.

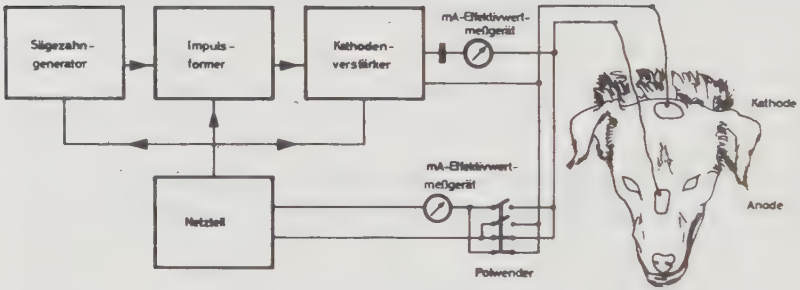


Abb. 2: Bauelemente des Elektronarkosegerätes nach der Methodik von Smith.

Am Ausgang des Kathodenverstärkers werden Gleich-und Rechteckwechselspannung zusammengeführt und überlagert. Der Kondensator am Kathodenverstärkerausgang soll die Gleichspannung vom Kathodenverstärker fernhalten. Dadurch wird erreicht, daß der Gleichstrom nur über die Elektroden und der dazwischenliegenden Gewebestrecke fließen kann. Im Gleichstromkreis befindet

sich außer einem Ampermeter zur Ermittlung der Stromstärke noch ein Polwender, mit dessen Hilfe die Polarität der Gleichspannung geändert werden kann. Das Ampermeter im Rechteckwechselstromkreis zeigt den Effektivwert an, wobei unter Effektivwert der quadratische Mittelwert der Augenblickswerte gemäß folgender Gleichung zu verstehen ist:

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 \, dt} \qquad (1)$$

Bei rechteckförmiger Wechselspannung läßt sich die Gleichung (1) auflösen in:

$$I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \; i_1^2 \, \tau - i_2^2 \; (T - \tau)} \qquad (2)$$

Als Effektivwertzeiger wird ein Dreheiseninstrument verwendet.

i_1 = positiver Spitzenstrom, der während des Impulses fließt.
i_2 = negativer Spitzenstrom, der während der Impulspause
(T -) fließt.
= Impulsdauer
T = Periodendauer

Die elektrische Schaltung des Elektronarkosegerätes ist aus der Abb. 3 zu ersehen. Der Sägezahngenerator besteht aus der Röhre 1, den Widerständen R 1 bis R 5 und den Kondensatoren C 1 und C 2. Als Röhre 1 wurde eine gasgefüllte Triode, auch Thyratron oder steuerbarer Gleichrichter genannt, gewählt. Die Eigenart dieser Röhre besteht darin, daß bei einer bestimmten Spannung zwischen Kathode und Anode eine Glimmentladung bzw. Zündung einsetzt. Aufgrund des leitenden Gases kommt ein Anodenstrom zustande. Durch Änderung der negativen Vorspannung des Gitters kann der Zündeinsatzpunkt verändert werden, wobei

jedoch die einmal in Gang gesetzte Glimmentladung vom Gitter her nicht wieder gelöscht werden kann. Über dem Spannungsteiler R 1/R 2 liegt das Gitter der Röhre 1 an einer festen Spannung. Im Kathodenkreis befinden sich die Widerstände R 4 und R 5. In Reihe dazu liegt der Kondensator C 2 am positiven Pol der Anodenspannung. Wird die Anodenspannung eingeschaltet, lädt sich der Kondensator C 2 über R 4 und R 5 langsam auf. Dementsprechend langsam steigt auch die Spannung zwischen Kathode und Anode der Röhre 1 an, bis der Zündpunkt erreicht ist. Die Glimmentladung setzt lawinenartig ein. Durch die plötzliche Leitfähigkeit der Röhre 1 wird der Kondensator C 2 wieder entladen; die Spannung zwischen Kathode und Anode fällt unter den Zündpunkt zurück und die Entladung reißt ab. Das Aufladen von C 2, die Zündung der Röhre 1 mit anschließender Entladung von C 2 wiederholt sich von neuem. Die Frequenz, mit der dieser Vorgang abläuft, ist abhängig von der Größe des Kondensators C 2 und den Widerständen R 4 und R 5 und kann mit dem Regler R 5 variiert werden. Der jeweils bei gezündeter Röhre kurzzeitig fließende Anodenstrom erzeugt am Anodenwiderstand R 3 einen Spannungsabfall. Über den Kondensator C 1 wird dieser negative Spannungsimpuls auf die Impulsformerstufe übertragen. Der Sägezahngenerator ist also das frequenzbestimmende Glied.

Die Aufgabe der Impulsformerstufe besteht darin, die vom Sägezahngenerator ankommenden Nadelimpulse in eine Rechteckimpulsspannung mit konstanter Impulsdauer umzuwandeln. Sie besteht im wesentlichen aus einem monostabilen Multivibrator, der aus den Röhren 2a und 2b, den Widerständen R 6 bis R 14 und den Kondensatoren C 3 bis C 5 aufgebaut ist. Im Ruhezustand, d.h. bei nicht angeschlossenem Sägezahngenerator, fließt im Stromkreis der Röhre 2 b Strom, während Röhre 2a stromlos, bzw. gesperrt ist. Der Kondensator C 3 zwischen Anode der Röhre 2a und Gitter der Röhre 2 b ist aufgeladen. Kommt jetzt ein negativer Impuls vom Sägezahngenerator, entlädt sich C 3; das Gitter der Röhre 2b wird negativ, Röhre 2b wird stromlos und da das Gitter der Röhre 2a jetzt positiv ist, übernimmt Röhre 2a den Strom. Dieser Vorgang spielt sich ebenfalls lawinenartig ab.

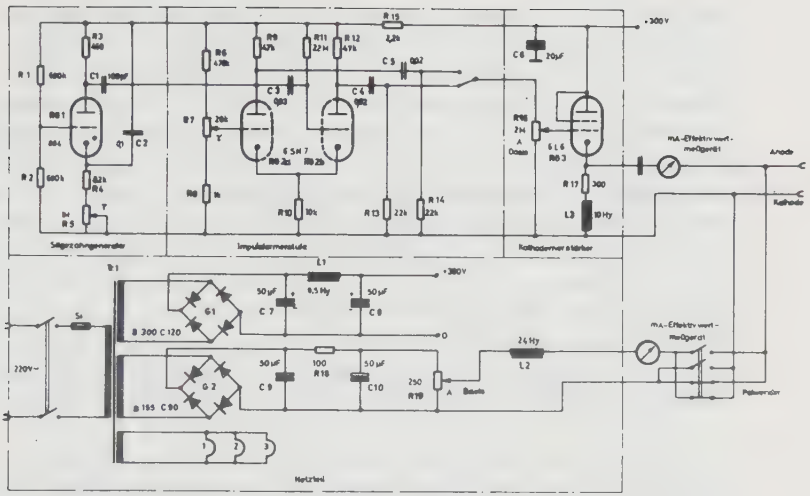


Abb. 3: Die elektrische Schaltung des Elektronarkosegerätes nach der Methode von Smith.

Erst wenn sich der Kondensator C 3 wieder aufgeladen hat und die Gitterspannung der Röhre 2 b gleich oder positiver wie das Gitter von Röhre 2a wird, fließt durch Röhre 2b Strom, die Ladung von C 3 nimmt jetzt sprunghaft zu und es erfolgt die Stromumschaltung auf Röhre 2b, wobei jetzt Röhre 2a gesperrt ist. Während der Impulsdauer ist Röhre 2b gesperrt; in den Impulspausen fließt durch Röhre 2b Strom. Die Zeitdauer währenddessen Röhre 2b stromlos ist, hängt von der Gittervorspannung der Röhre 2a ab und kann mit dem Spannungsteilerwiderstand R 7 eingestellt werden. Die Ausgangsrechteckimpulsspannung wird am Widerstand R 12 abgenommen und über Kondensator C 4 und Widerstand R 15 ausgekoppelt.

Um die Impulsformerstufe, d.h. den monostabilen Multivibrator nicht zu belasten, wird die Rechteckspannung einem Kathodenverstärker zugeführt. Diese Stufe, bestehend aus der Röhre 3, den Widerständen R 16 und R 17 und der Drossel L 3, stellt einen Verstärker mit einem Verstärkungsfaktor = 1 dar. Die Eigenart dieses Verstärkers besteht darin, daß er einen relativ niederohmigen Ausgang besitzt, wodurch die Ausgangsspannung unabhängig von der äußeren Belastung annähernd konstant bleibt. Man bezeichnet deshalb den Kathodenverstärker auch als Impedanzwandler. Die Arbeitspunkteinstellung der Röhre 3 erfolgt mit dem Widerstand R 17; der Wechselspannungsausgangswiderstand wird in der Hauptsache von der Drossel L 3 bestimmt. Im Gitterkreis der Röhre befindet sich ein als Potentiometer ausgebildeter Spannungsteiler mit dem die Ausgangsspannung kontinuierlich eingestellt werden kann.

Als Anodenspannung für die einzelnen Baugruppen wird die gleichgerichtete Sekundärspannung des Netztransformators Tr1 verwendet, die nach der Gleichrichtung mit dem Ladekondensator C 7, dem Siebkondensator C 8 und der Siebdrossel L 2 geglättet wird.

Die an der zweiten Sekundärwicklung anliegende Spannung wird nach Gleichrichtung (G 2) und Glättung mit C 9, C 10, R 18 einem regelbaren Spannungsteiler R 19 zugeführt, mit welchem die Gleichspannung geregelt werden kann. In der schon geschilderten Weise wird diese Gleichspannung mit der Rechteckimpulswechselspannung überlagert und den als Anode und Kathode bezeichneten Elektroden zugeführt. Die im Gleichstromkreis liegende Drossel L 2 soll einen Kurzschluß der Rechteckwechselspannung über R 19 verhindern.

Technische Daten:

Gleichspannung:	0 - 30 V
max. Gleichstrom:	bei einem Belastungswiderstand von 500 = 26 mA

Rechteckimpulswechselspannung:	
Frequenz:	a) 80 - 200 Hz
	b) 500 Hz
Impulsdauer:	zu Frequenz a) = 0,8 - 2 msec
	zu Frequenz b) = 0,2 msec
Spitzenspannung u_{ss}:	0 - 200 V
max. Effektivstrom:	bei einem Verhältnis Impulsdauer/ Impulspause von 1:9 und einem Belastungswiderstand von 500 = 70 mA

b. Elektronarkosegerät nach der Methodik von Hardy, Fabian zur Erzeugung eines Sinuswechselstromes.

Die Forschergruppe um Hardy, Fabian (22,35,36) gingen von den Versuchen von Knutson (58,59) aus und verwendeten einen sinusförmigen Wechselstrom, meistens mit einer Frequenz von 700 Hz, für die Elektronarkose. (Abb. 4)

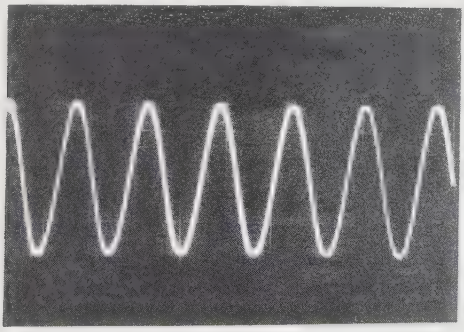


Abb. 4 : Stromform, bzw. Spannungsverlauf bei der Elektronarkose nach der Methodik von Hardy, Fabian. Sinusförmiger Wechselstrom

Das dazu erforderliche Narkosegerät ist im Prinzip in Abb. 5 dargestellt. Eine Oszillatorstufe erzeugt die sinusförmige

Spannung, die in der nachfolgenden Stufe verstärkt wird. Im Ausgangsstromkreis dieses Verstärkers sind ein Ampermeter und ein Voltmeter angeschlossen, um Strom und Spannung entsprechend dosieren zu können. Die Instrumente zeigen den Effektivwert an. Ein Netzteil versorgt sowohl den Oszillator, als auch den Verstärker mit den notwendigen Betriebsspannungen.

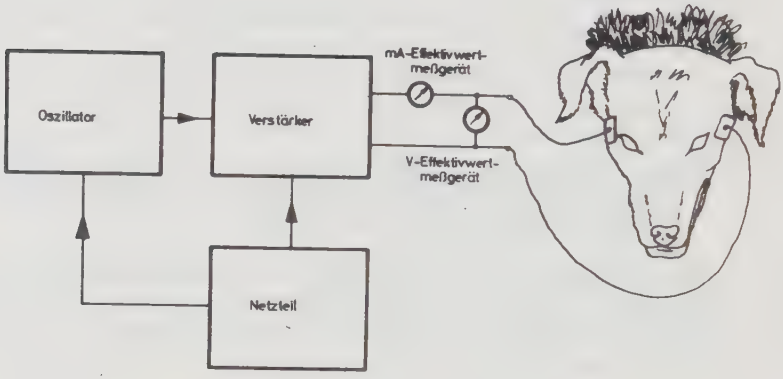


Abb. 5: Bauelemente des Elektronarkosegerätes nach der Methodik von Hardy, Fabian.

Wie aus dem Schaltbild der Abb. 6 hervorgeht, ist das Gerät volltransistorisiert. Die Oszillatorstufe besteht aus dem Transistor T 3, den Widerständen R 3 bis R 5, den Kondensatoren C 1 bis C 4 und dem Transformator Tr 2. Die Primärspulen L 1 und L 2 des Transformators Tr 2 und die umschaltbaren Kondensatoren C 1 bis C 4 bilden einen Resonanzschwingkreis, der im Kollektorkreis des Transistors T 3 und dessen Resonanzfrequenz

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{(L_1 + L_2) \cdot C}},$$

beträgt.

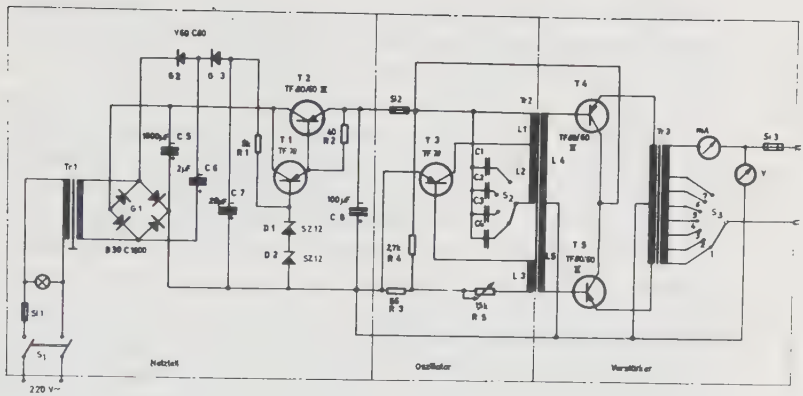


Abb. 6: Elektrische Schaltung des Elektronarkosegerätes nach der Methode von Hardy, Fabian.

Die Frequenz kann durch Umschalten der Kondensatoren C 1 bis C 4 mit Schalter S 2 geändert werden. Beim Einschalten entsteht in diesem Schwingkreis eine Schwingung, die in der Primärwicklung L 3 des Transformators Tr 2 eine Spannung induziert. Diese Spannung wird phasengleich auf die Basis des Transistors T 3 zurückgekoppelt. Dadurch wird die Schwingung aufrechterhalten. Der Grad der Rückkoppelung läßt sich in kleinen Grenzen mit dem Widerstand R 5 verändern. Die erforderliche Basisvorspannung wird mit dem Spannungsteiler R 3/ R 4 erzeugt. Um die Dämpfung des Schwingkreises so klein wie möglich zu halten, ist die Schwingkreisspule (L 1 und L 2) unterteilt. Die Auskoppelung erfolgt mit der Sekundärspule von Tr 2.

An die mit Mittelabgriff und in L 4 und L 5 unterteilte Sekundärspule ist der Verstärker angeschlossen. Er besteht aus den beiden Transistoren T 4 und T 5 und dem Überträger Tr 3. Die Transistoren sind im Gegentakt geschaltet, wodurch sich ein

besonders leistungsstarker Verstärker ergibt. Die in die Sekundärwicklung des Überträgers induzierte Wechselspannung wird den Elektroden zugeführt. Mit dem Schalter S 3 kann die Ausgangsspannung in Stufen abgenommen werden.

Der Netzteil liefert eine elektronisch stabilisierte Versorgungsspannung. Die Stabilisierung erfolgt im wesentlichen durch den veränderlichen Kollektor-Emitterwiderstand des Transistors T 2, der von dem Treibertransistor T 1 und den die Vergleichsspannung liefernden Zenerdioden D 1 und D 2 gesteuert wird. Bei Spannungserniedrigung, entweder hervorgerufen durch Laständerungen oder durch Netzspannungsschwankungen, verkleinert sich der Kollektor-Emitterwiderstand solange, bis die ursprüngliche Ausgangsspannung wieder erreicht ist. Die Stabilisierungsstufe wird von der mit dem Gleichrichter G 1 gleichgerichteten Sekundärspannung des Netztransformators Tr 1 gespeist. Die Glättung dieser Spannung erfolgt mit dem Kondensator C 5. Die stabilisierende Wirkung hängt in erster Linie von den Zenerdioden, bzw. der Querströmen ab. Die Stabilisierung läßt sich erhöhen, wenn der Zenerdioden-Vorwiderstand R 1 und der Zenerstrom groß sind. Dies durch die Spannungsverdopplerstufe, bestehend aus Gleichrichter G 2, G 3 und den Kondensatoren C 6 und C 7 erreicht.

Technische Daten:

Sinuswechselspannung:	20 V, 30 V, 40 V, 50 V bei 700 Hz
Frequenz:	400 Hz, 550 Hz, 700 Hz, 800 Hz
max. Strom:	bei 700 Hz und bei einem Belastungswiderstand von 500 = 56 mA

Überwachung der Stromkurve:

Der Spannungsverlauf beider Elektronarkosegeräte kann ständig mittels eines Kathodenstrahloszillographen überprüft werden.

c. Elektrodentechnik

1. Elektrodenhalterung

Das erstemal versuchten wir es mit Elektroden, welche mittels einer Federvorrichtung auf den Kopf aufgedrückt wurden. Der Abstand der Elektroden kann beliebig eingestellt werden. Die Elektroden sind beweglich an einem Gestell, in welches auch der Hundekopf eingespannt wird, befestigt.

5 mal benützten wir Maulkorb, elastische Binden und Heftpflaster, um die Elektroden fest auf dem Kopf zu halten.

In 20 Versuchen implantierten wir die Elektroden unter die Haut und Muskelschicht direkt auf die Schädelkalotte. Die Elektrodenecken wurden am umliegenden Gewebe fixiert. 4 mal waren die Elektroden direkt auf die Meningen fronto-occipital implantiert. Die Bohrlöcher in der Schädelkalotte wurden mit einer Kunststoffharzmasse verschlossen. Diese Operationen wurden unter Trapanalnarkose vorgenommen.

Abb. 7: Implantierte Narkoseelektroden am Hundeschädel. Fronto-occipitale Elektrodenanordnung.

2. Elektrodenmaterial:

Bei den von außen auf die Haut aufgelegten Elektroden benützten wir Silberelektroden (Größe:2 cm mal 2 cm). Die Haut wurde glatt rasiert, mit Elektrodenflüssigkeit gut angefeuchtet. Unter den Elektroden lagen noch Mulläppchen, die gut mit Elektrodenflüssigkeit getränkt waren.

Da es sich bei der Elektronarkose nach der Methode von Smith ausschließlich um Gleichströme handelt, muß auf den Werkstoff der Elektroden, vorallem wenn sie implantiert werden und der Strom lange Zeit fließt, besonderes Augenmerk gerichtet werden. Von den anfänglich verwendeten Kupferelektroden (Größe: 2 cm mal 2 cm) hatte sich die Anode vollkommen aufgelöst, während die Anode unverändert erhalten geblieben war. Wegen der elektrolytischen Zersetzung können als geeignet für die Anodenelektrode Platin, Paladium und Thorium betrachtet werden. Wir verwendeten Platinblech (Größe:2 cm mal 2 cm) für die Anode und wegen der guten Gewebeverträglichkeit für die Kathode Silber (Größe: 2 cm mal 2 cm). Bei Sinuswechselstrom wurden zum Teil nur Silberelektroden verwendet.

3. Elektrodenanordnung:

Wir legten bei unseren Versuchstieren die Elektroden entweder in der Median-Sagittallinie oder bitemporal an. Um zu sehen welchen Einfluß die Elektrodenanordnung auf den Erfolg der Elektronarkose hat.

d. Fixation der Tiere:

Bei der Fixation der Tiere wurde darauf geachtet, daß die Tiere noch genügend Bewegungsfreiheit haben, damit die Reaktionen bei Stromapplikation ungestört beobachtet werden konnten. Die Tiere lagen in Bauchlage an den Extremitäten festgebunden auf einem Tisch. Diese Lagerung und Fixierung ist für die Tiere einigermaßen bequem. (Abb. 8)

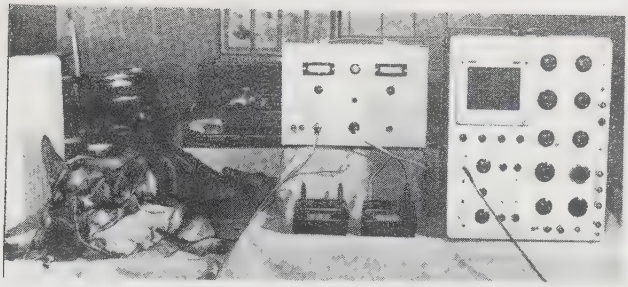


Abb. 8: Versuchsanordnung zur Elektronarkose. Rechts: Meß-oscillograph. Mitte: Stromgenerator, davor Kontrollgeräte für Stromspannung und Stromstärke. Links: Versuchstier mit occipito-temporalen implantierten Platinelektroden.

III. Versuchsergebnisse:

Teil 1

a. Elektronarkoseversuche nach der Methode von Smith:

Im Verlauf der Untersuchungen wurden 16 Elektronarkoseversuche mit dem mit Gleichstrom kombinierten Rechteckimpulswechselstrom einer Frequenz von 100 Hz, einer Impulsdauer von 1 msec und einem Verhältnis von Impuls zu Impulspause von 1:9 durchgeführt.

Die Analgesie wurde durch Zwicken mit einer Tuchklemme in die Rückenhaut, die Fußballen und die Schwanzspitze und durch tiefes Einstechen einer Injektionsnadel (Durchmesser: 2 mm, Länge 80 mm) in die Hinterschenkelmuskulatur ermittelt. Wenn keine Reaktion auf diese schmerzhaften Reize mehr zu beobachten war, nahmen wir an, daß das Analgesiestadium erreicht ist und die Stromstärke wurde nicht weiter erhöht. Die Geschwindigkeit, mit welcher die Stromstärke gesteigert wurde, war verschieden. Es wurden 7 verschiedene Versuchstiere (Hunde) verwendet.

Versuchsprotokolle:

Versuch Nr. 1; Hund Nr. 1, 13 kg
Elektrodenanordnung: Anode an Stirn, Kathode am Occiput.
Elektrodenhalterung: Der Abstand der Elektroden kann in einem Gestell je nach Wunsch eingestellt werden. Die Elektroden werden mittels einer Federvorrichtung auf den Kopf, der in dieses Gestell fest eingespannt ist, aufgedrückt.
Das Tier unternimmt bei Stromsteigerung sehr heftige Befreiungsversuche. Starke Elektrodenverschiebungen. Als Folge davon große Stromstärkeschwankungen. Es tritt keine Beruhigung ein. Es kann keine Analgesie erreicht werden. Der Versuch wird unterbrochen.

Versuch Nr. 2; Hund Nr. 2
Elektrodenanordnung: wie in Versuch Nr. 1
Elektrodenhalterung: mit Heftpflaster und elastischen Binden auf die enthaarte Kopfhaut gebunden.
Fixierung d. Tieres: Der Hund wird in einen verschließbaren Kasten gesperrt, welcher Öffnungen für Kopf und Extremitäten hat.
Das Tier wird in einer sehr beengten Lage festgehalten. Ständig sehr starke Unruhe, heftige Befreiungsversuche. Krampfartige Zustände. Urination, Defäkation. Bei 20 mA Gleichstrom und 25 mA Impulsstrom keine Reaktion auf schmerzhafte Reize ersichtlich. Nach 1 1/2 Stunden Exitus, da durch den Kastenrand bei herunter hängendem Kopf die Luftzufuhr blockiert war.

Versuch Nr. 3; Hund Nr. 3, 12,2 kg
Elektrodenanordnung: Anode am Occiput, Kathode zwischen den Augen.
Elektrodenhalterung: mit Maulkorb und elastischen Binden am Kopf fixiert.
Initiale Stromzufuhr: a) 2 mA Impulsstrom. b) 20 mA Gleichstrom innerhalb von 2 sec. c) Impulsstrom, Zufuhr von 1 mA/15 sec.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
10^{10}	2 mA Impuls.	keinerlei Reaktion.
	20mA Gleich.	
	5 mA Impuls.	Winseln und Heulen. Häufiges und kräftiges Niesen. Heftige Befreiungsversuche.
10^{14}	15mA Impuls.	Tier wird ruhig. Langsame und tiefe Atmung. Geschlossene Augenlider.
	19mA Impuls.	Geringe Reaktion auf Schmerzreize.
10^{17}	25mA Impuls.	Krampf, Aufheulen. Starke Stromstärkeschwankungen. Dann wieder Ruhe.
	28mA Impuls.	Heftiger tonischer Krampf mit klonischen Zuckungen, kurzzeitiger Atemstillstand. Nach Beruhigung keine vollständige Analgesie. Erschwerte Atmung.
10^{25}		Strom wird abgeschaltet, da keine Analgesie erreicht werden konnte, ohne das Tier zu gefährden. Der Hund ist sogleich wieder normal.

Versuch Nr. 4; Hund Nr. 3, 12,2 kg
Elektrodenanordnung und -halterung wie in Versuch Nr.3
Initiale Stromzufuhr: a) 2 mA Impulsstrom. b) 20 mA Gleichstrom innerhalb von 2 sec. c) 20 mA Impulsstrom innerhalb von 2 sec.

10^{30}	20mA Gleich. 20mA Impuls.	30 sec andauernder Atemstillstand mit einem tonischen Krampf. Dann ruhige Lage.
10^{35}		Sehr starker Niesanfall. Aufbäumen, Stromschwankungen.
10^{40}	30mA Impuls.	tonisch-klonischer Krampf mit Atemstillstand, keine Analgesie.
10^{45}		Strom wird abgeschaltet.

Versuch Nr. 5; Hund Nr. 3, 12,2 kg
Elektrodenanordnung : Anode am Occiput, Kathode am Scheitel.
Elektrodenhalterung : wie in Versuch Nr. 3.
Initiale Stromzufuhr: a) 20 mA Gleichstrom innerhalb von 2 sec.
b) Impulsstromzufuhr innerhalb von wenigen Sekunden.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
11^{00}	20 mA Gleich. 15 mA Impuls.	Etwa 30 sec dauernder Atemstillstand. Dann Beruhigung, starke Salivation.
11^{05}	24 mA Impuls.	kurzzeitiger tonischer Krampf mit Atemstillstand. Dann wieder Beruhigung.
11^{10}	30 mA Impuls.	Heftige tonisch-klonische Krämpfe. Keine Analgesie.
11^{15}		Strom wird abgeschaltet. Hechelatmung. Im allgemeinen normales Verhalten. Verweigerung von angebotenem Wasser.

Versuch Nr. 6; Hund Nr. 3, 12,2 kg
Elektrodenanordnung : Anode am Occiput, Kathode auf den Augen.
Elektrodenhalterung : wie in Versuch Nr. 3.
Initiale Stromzufuhr: a) 20 mA Gleichstrom innerhalb von 2 sec.
b) Impulsstromzufuhr innerhalb von wenigen Sekunden.

10^{20}	20 mA Gleich.	Dorsalflexion des Kopfes. Allgemeines Muskelzittern. Hund schleckt.
	5 mA Impuls.	Preßatmung.
	14 mA Impuls.	tonisch-klonischer Krampf.
	18 mA Impuls.	Muskelzittern. Erhöhter Muskeltonus.
10^{30}	20 mA Impuls.	Preßatmung. Stark tonisierte Muskulatur. Klonische Zuckungen. Analgesie.
10^{35}		Heftige Unruhe, Winseln, Krampfanfälle, Defäkation, flache Hechelatmung. Keine Stromstärkeschwankungen.
10^{44}		Strom wird abgeschaltet. Hund ist sofort wach. Erholt sich aber nur langsam.

Versuch Nr. 7; Hund Nr. 4, 18 kg
Elektrodenanordnung : Anode zwischen den Augen, Kathode am Occiput.
Elektrodenhalterung : Implantation unter Haut und Muskelschicht.
Elektrodenmaterial : Kupferfolien.
Initiale Stromzufuhr: a) 2 mA Impulsstrom. b) 20 mA Gleichstrom innerhalb von 7 Min. c) Impulsstrom, Steigerungs geschwindigkeit 1 mA/ 10 min.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
9^{45}	2 mA Impuls.	Hund wirft Kopf hin und her. Niesen.
9^{54}	20 mA Gleich.	Öfters Fluchtreaktionen. Winseln.
	4 mA Impuls.	Ruhigeres Verhalten. Schließen der Augen.
10^{35}	7 mA Impuls.	Kurzzeitiger tonischer Krampf. Urination. Defäkation. Wieder Beruhigung. Abgeschwächte Schmerzreaktionen.
10^{45}	8 mA Impuls.	Krampfartiges Aufbäumen, Aufheulen, Opistotonus, Hechelatmung. Stromstärkeschwankungen zwischen 6-12 mA. Danach Ruhe. Analgesie. Fibrieren der Augenlider. Bulbi starr fixiert. Laryngospasmus, Atembeschwerden.
10^{55}		Excessiver Speichelfluß.
13^{00}		Analgesie hat nachgelassen. Erhöhung der
	10 mA Impuls.	Stromstärke auf 10 mA.
14^{14}		Starke konjunktivale Injektion.
16^{00}		Analgesie hat nachgelassen. Stromstärke-
	14 mA Impuls.	erhöhung auf 14 mA. Kurzdauernder tonischer Krampf, Opistotonus, Atemstillstand, Wimmern. Anschließend Ruhe mit Analgesie. Hechelatmung.
17^{55}		Strom wird abgeschaltet. Hund ist sofort wach. Hechelatmung. Laufen ist erschwert wegen der langandauernden Fesselung. Hund macht einen müden Eindruck. Er legt sich sofort zum Schlafen. Für einige Minuten keine Reaktion auf schmerzhafte oberflächliche Reize.
Am anderen Tag:		Sehr starke Entzündung an der Stelle, wo Anode implantiert (zwischen den Augen) war.

Versuch Nr. 8; Hund Nr. 4, 18 kg
Elektrodenanordnung, -halterung, -material und initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 7.
Der Hund ist von Anfang an sehr appatisch auf Grund der Behandlung am Tage vorher.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
8^{15}	20 mA Gleich.	Keine Reaktion.
8^{25}	3 mA Impuls.	Hund scheint zu schlafen.
9^{05}	7 mA Impuls.	Analgesie. Hund schläft. Leichte Fibrationen der Augenlider.
9^{27}		Starke Stromstärkeschwankungen. Heftige Unruhe. Schütteln des ganzen Körpers. Dann wieder Beruhigung. Atembeschwerden.
9^{35}		Blutig-schleimiger Ausfluß aus der Nase.
10^{55}		Analgesie hat nachgelassen. Stromstärke
	14 mA Impuls.	muß auf 14 mA erhöht werden.
10^{57}		Starke Stromstärkeschwankungen, infolgedessen starke motorische Unruhe mit Krämpfen. Dann wieder Analgesie.
11^{50}		Impulsstromstärke geht langsam zurück. Schwankungen zwischen 5-8 mA. Kann nicht mehr höher reguliert werden. Gleichstrom bleibt bei 5 mA.
13^{10}		Versuch wird abgebrochen, da die zur Analgesie notwendigen Stromstärken nicht mehr erreicht werden können.
		Die Elektroden werden entfernt. Dabei zeigt sich, daß die Kathode am Hinterkopf völlig unverändert, daß sich aber die Anode total aufgelöst hat. Es bleibt eine große grünlich eiternde Wunde zurück.

Versuch Nr. 9; Hund Nr. 1, 13 kg
Elektrodenanordnung, -halterung wie in Versuch Nr. 7.
Elektrodenmaterial : Anode aus Platin, Kathode aus Silber.
Initiale Stromzufuhr: a) 2 mA Impulsstrom. b) 20 mA Gleichstrom in Schritten von 3 mA/min. c) Impulsstromsteigerung mit einer Geschwindigkeit von 1 mA/15 sec.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
8^{50}	2 mA Impuls.	Keine Reaktion.
8^{56}	20 mA Gleich.	Keine wesentliche Reaktion. Manchmal Schütteln des Kopfes. Hund schleckt.
	12 mA Impuls.	Bis zu dieser Stromstärke heftige motorische Unruhe, Bellen, Heulen, krampfartiges Schütteln des ganzen Körpers.
	13-19 mA Imp.	Hund wird immer ruhiger. Kopf liegt entspannt auf der Tischplatte. Manchmal leises Winseln, wenn Stromstärke geändert wird.
9^{35}	20 mA Impuls.	Schmerzreize rufen nur eine geringe Reaktion hervor. Laryngospasmus. Atembeschwerden.
	25 mA Impuls.	Analgesie. Tier verhält sich ruhig und hält die Augen geschlossen.
15^{15}		Stromstärke ist konstant geblieben. Analgesie bleibt bestehen. Keine Salivation.
15^{30}		Strom wird abgeschaltet. Hund macht einen etwas müden Eindruck.

Versuch Nr. 10; Hund Nr. 5, 20 kg
Elektrodenanordnung,-halterung, -material, initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 9.

9^{45}		Bei Gleichstromzufuhr sträubt sich das Tier. Es ist ein Muskelbrummen an der Kopfseite
9^{52}	20 mA Gleich.	zu tasten.
9^{57}	20 mA Impuls.	Bis zu dieser Stromstärke erhöhte motorische Unruhe. Winseln. Erhöhter Tonus der Körpermuskulatur. Bei 20 mA tonische Krämpfe.
	30 mA Impuls.	Muskeltonus wird immer stärker. Vereinzelt klonische Zuckungen.
10^{01}	35 mA Impuls.	Starke tonisch-klonische Krämpfe mit Atemstillstand. Defäkation. Blutig-schleimiger Ausfluß aus der Nase. Keine Reaktion mehr auf schmerzhafte Reize. Laryngospasmus. Atembeschwerden.
10^{05}		Strom muß abgeschaltet werden, da die Atembeschwerden sehr erheblich sind. Langsame Erholung. Für kurze Zeit kataleptische Symptome. Hochfrequente Hechelatmung.

Versuch Nr. 11; Hund Nr. 6, 30 kg
Elektrodenanordnung, -halterung, -material, initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 9.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
10^{25}	2 mA Impuls.	Bei initialer Stromzufuhr sehr ruhiges Verhalten.
	20 mA Gleich.	
	8 mA Impuls.	Fibrieren der Augenlider.
10^{40}	28 mA Impuls.	Analgesie. Fibrieren der Augenlider, der Nacken-, Vorderbein und Hinterbeinmuskulatur. Mäßige Atembeschwerden.
10^{55}		Analgesie hat nachgelassen.
	30 mA Impuls.	Wieder Analgesie erreicht. Stromstärke muß immer wieder langsam nachreguliert werden, weil sie absinkt.
12^{14}	40 mA Impuls.	Weil Analgesie nachgelassen hat. Es kann trotzdem keine Analgesie erreicht werden.
13^{30}	60 mA Impuls.	Auch mit dieser Stromstärke keine Analgesie mehr zu erreichen. Hund verzieht die Lefzen. Starke tonisch-klonische Krämpfe. Atmung hochgradig erschwert.
13^{35}		Strom muß abgeschaltet werden, da durch die starken Atembeschwerden der Hund ad exitum zu gehen droht. Für kurze Zeit kataleptische Symptome. Hochfrequente Hechelatmung.

Versuch Nr. 12; Hund Nr. 6, 30 kg
Elektrodenhalterung, -anordnung, -material, initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 9.
Bei Stromsteigerung oder Änderung Winseln. Während des Analgesiestadiums Zittern der Augenlider, der Lefzen, der Nacken-, Vorderbein und Hinterbeinmuskulatur. Sonst liegt der Hund mit geschlossenen Augen auf dem Tisch ohne sich zu bewegen.

10^{16} -	20 mA Gleich.	
12^{15}	30 mA Impuls.	Analgesiestadium.

Postnarkotisch wach, aber müde.

Versuch Nr. 13; Hund Nr. 5, 20 kg
Elektrodenanordnung: Kathode am Occiput, Anode zwischen den Augen.
Elektrodenhalterung, -material, initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 9.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
11^{30}	2 mA Impuls.	Keine besonderen Reaktionen.
	20 mA Gleich.	Hund schleckt.
	5 mA Impuls.	Wechselnd ruhig und unruhig.
11^{36}	6 mA Impuls.	Heftiges Winseln, Aufbäumen. Kopf seitlich nach hinten gezogen.
	11 mA Impuls.	Verstärkte Salivation.
	16 mA Impuls.	Tremor der Nackenmuskulatur.
	19 mA Impuls.	Tremor der gesamten Körpermuskulatur.
11^{40}	23 mA Impuls.	Tonisch-klonische Krämpfe. Defäkation.
	26 mA Impuls.	Krämpfe werden immer heftiger. Keine Analgesie. Hochgradige Atembeschwerden.
11^{45}		Strom wird abgeschaltet, da ohne Gefährdung des Tieres der Strom nicht höher geschraubt werden kann. Hund niest blutigen Schleim aus. Hochfrequente Hechelatmung. Erschöpfung.

Versuch Nr. 14; Hund Nr. 7, 14,5 kg
Elektrodenanordnung: bitemporal.
Elektrodenhalterung: Implantation unter Haut und Muskelschicht.
Elektrodenmaterial : Silberfolien.
Initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 9.

12^{45}	2 mA Impuls.	Hund sträubt sich etwas.
	20 mA Gleich.	
12^{51}	5 mA Impuls.	Hund beruhigt sich. Erhöhte Salivation. Kontrahierte Nackenmuskulatur.
12^{55}	18 mA Impuls.	Bei Steigerung bis zu dieser Stromstärke keine Unruheerscheinungen. Analgesie. Kopf zur Anode gewendet. Augenlider geschlossen. Fibrieren der Augenlider, Nacken-, Vorderbein- und Hinterbeinmuskulatur.
13^{05}		Da Stromstärke etwas abgefallen ist, muß nachreguliert werden. Tonus der Körpermuskulatur nur geringgradig erhöht. Verstärkte Salivation. Atembeschwerden.
14^{55}		Strom wird abgeschaltet. Hund ist sofort wach.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
		Er scheint etwas müde zu sein. Nach 5 Minuten noch oberflächliche Analgesie.

Versuch Nr. 15; Hund Nr. 6, 30 kg
Elektrodenanordnung: bitemporal.
Elektrodenhalterung: Implantation.
Elektrodenmaterial : Silberfolien.
Initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 9.
Verhalten des Tieres ganz ähnlich wie in Versuch Nr. 12. Der Kopf ist nur zur Anode hin gewendet.

9^{30} -	20 mA Gleich.	
10^{30}	60 mA Impuls.	Analgesie.

Versuch Nr. 16; Hund Nr. 1, 13 kg
Elektrodenanordnung: Anode frontal, Kathode occipital.
Elektrodenhalterung: Implantation direkt auf die dura mater. (Die Elektroden wurden am Tage vorher durch Bohrlöcher intracranial eingesetzt. Anschließend wurden die Löcher mit Palakost verschlossen. Die Muskulatur wurde zugenäht.)
Elektrodenmaterial : Silber. Form: Rund. Größe: etwa 1 cm^2.

10^{10}	5 mA Gleich.	Hund zeigt keine Reaktion.
10^{15}	7 mA Impuls.	Der Impulsstrom wurde kontinuierlich innerhalb von 2 Min. bis zu dieser Stromstärke gesteigert. Kurzzeitiger tonischer Krampf. Zuckungen der Augenlider. Erhöhter Tonus der Nackenmuskulatur.
10^{16}	8 mA Impuls.	Flache Atmung.
10^{18}	10 mA Impuls.	Tonischer Krampf mit Atemstillstand. Opistotonus. Tier krümmt sich sehr stark. Tier droht zu ersticken. Deswegen wird Stromstärke auf
	3 mA Impuls.	zurückgedreht.
10^{23}	9 mA Impuls.	Stromstärke wurde langsam und kontinuierlich gesteigert. Tonischer Krampf mit klonischen Zuckungen etwa eine halbe Min.. Dann Analgesie. Ruhige Lage. Augen geschlossen.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
10^{26}		Plötzlich tonisch-klonischer Krampf. Urination. Dann wieder Beruhigung. Erhöhter Tonus der Nacken-und Vorderbeinmuskulatur. Zuckungen der Augenlider und der Gesichtsmuskeln. Brummen der Kaumuskeln.
10^{32}		Tonisch-klonischer Krampf. Atemstillstand. Nach einer halben Min. wieder Beruhigung.
10^{56}		Strom wird abgeschaltet. Hund für kurze Zeit kataleptisch. Bei der Sektion erkennt man am Elektrodensitz Verbrennungen der Meningen und des Parenchyms.

Tabelle Nr. 1.: Übersicht über die Elektronarkoseversuche nach der Methode von Smith.

Versuch Nr.	Versuchs-dauer	Stromstärke	Erfolg
Elektroden von außen auf die Haut gelegt; fronto-occipital:			
1 (Hund Nr.1)			Sehr starke Unruhe. Starke Stromstärkeschwankungen. Keine Analgesie.
2 (Hund Nr.2)		20 mA Gleich. 25 mA Impuls.	Schmerzhafte Stromzufuhr. Sehr starke Unruhe. Starke Stromstärkeschwankungen. Krämpfe. Hypalgesie. Exitus.
3 (Hund Nr.3)	15 min.	20 mA Gleich. 28 mA Impuls.	Sehr schmerzhafte Einleitungsphase. Starke Stromschwankungen. Tonisch-klonische Krämpfe mit Apnoe. Teilanalgesie.
4 (Hund Nr.3)	10 min.	20 mA Gleich. 20 mA Impuls.	Plötzliche Stromzufuhr mit tonischen Krampf und Apnoe. Tonisch-klonische Krämpfe mit starken Atembeschwerden. Keine Analgesie.
5 (Hund Nr.3)	15 min.	20 mA Gleich. 30 mA Impuls.	Schnelle Stromzufuhr bewirkt Atemstillstand. Tonisch-klonische Krämpfe mit starken Atembeschwerden. Keine Analgesie.

Versuch Nr.	Versuchs-dauer	Stromstärke	Erfolg
Anode am Occiput, Kathode auf den Augen:			
6 (Hund Nr.3)	25 min.	20 mA Gleich. 20 mA Impuls.	Unruhige Einleitungsphase. Starkes Muskelzittern. Krämpfe. Preßatmung. Analgesie. Postnarkotisch: erschöpft.
Implantierte Elektroden; fronto-occipital:			
7 (Hund Nr.4)	6 Std. u. 10 min.	20 mA Gleich. 8-14 mA Impuls.	Schmerzhafte Einleitungsphase. Tonische Muskelstarre. Atembeschwerden. Analgesie. Postnarkotisch: sofort wach, aber müde. Oberflächliche Analgesie.
8 (Hund Nr.4)	4 Std. u. 52 min.	20 mA Gleich. 7-14 mA Impuls.	Ruhige Einleitungsphase. Stromstärkeschwankungen. Starke motorische Unruhe mit Krämpfen. Atembeschwerden. Analgesie. Kupferelektroden lösen sich auf.
9 (Hund Nr.1)	6 Std. u. 40 min.	20 mA Gleich. 25 mA Impuls.	Sehr schmerzhafte Einleitungsphase. Normaler Muskeltonus. Erschwerte Atmung. Gute Analgesie. Postnarkotisch: müde, aber sofort wach.

Versuch Nr.	Versuchs-dauer	Stromstärke	Erfolg
10 (Hund Nr.5)	20 min.	20 mA Gleich. 35 mA Impuls.	Schmerzhafte Einleitungsphase. Stark erhöhter Muskeltonus. Starke tonisch-klonische Krämpfe. Erhebliche Atembeschwerden. Abgeschwächte Schmerzempfindlichkeit. Postnarkotisch: kataleptisch, hochfrequente Hechelatmung, langsame Erholung.
11 (Hund Nr.6)	3 Std. u. 10 min.	20 mA Gleich. 28-60 mA Imp.	Ruhige Einleitungsphase. Fibrationen der Kopf-, Nacken-und Extremitätenmuskulatur. Atembeschwerden. Analgesie, läßt aber nach und kann trotz Erhöhung der Stromstärke nicht mehr erreicht werden. Postnarkotisch: kataleptisch.
12 (Hund Nr.6)	2 Std.	20 mA Gleich. 30 mA Impuls.	Schmerzhafte Einleitungsphase. Muskeltonus normal. Muskelfibrationen an Kopf, Nacken und Extremitäten. Mäßige Atembeschwerden. Analgesie. Postnarkotisch: müde.
13 (Hund Nr.5)	15 min.	20 mA Gleich. 20 mA Impuls.	Schmerzhafte Einleitungsphase. Tremor der gesamten Muskulatur. Tonisch-klonische Krämpfe. Hochgradige Atembeschwerden. Keine Analgesie. Postnarkotisch: erschöpft, hochfrequente Hechelatmung.

Implantierte Elektroden; bitemporal:

Versuch Nr.	Versuchs-dauer	Stromstärke	Erfolg
14 (Hund Nr.7)	2 Std. u. 10 min.	20 mA Gleich. 18 mA Impuls.	Relativ ruhige Einleitungsphase. Kopf zur Anode gewendet. Muskelfibrationen an Kopf, Nacken und Extremitäten. Muskeltonus etwas erhöht. Atembeschwerden. Analgesie. Postnarkotisch: müde. Oberflächliche Analgesie.
15 (Hund Nr.6)	1 Std.	20 mA Gleich. 60 mA Impuls.	Ruhige Einleitungsphase. Kopf zur Anode gewendet. Am Kopf und Oberkörper Muskelfibrationen. Geringe Atembeschwerden. Analgesie. Postnarkotisch:müde.
Elektroden auf Meningen implantiert; fronto-occipital:			
16 (Hund Nr.1)	20 min.	5 mA Gleich. 9 mA Impuls.	Während Einleitungsphase erhöhter Tonus und Zuckungen der Nackenmuskulatur. Analgesie, wird aber unterbrochen von tonisch-klonischen Krämpfen mit Atemstillstand. Postnarkotisch:kataleptisch

Tabelle Nr. 2

Zusammenfassung der Elektronarkoseversuche nach der Methode von Smith.

Elektrodenbefestigung und -anordnung	Anzahl der Versuche (Versuchsnr.)	Häufigkeit d. erreichten Analgesie	Analgesiestromstärke
Der Haut aufgelegt	5	(1)	20 mA Gleich.
fronto-occipital	(Versuch 1-5)	(Versuch 2)	25 mA Impuls.
Kathode auf Augen	1	1	20 mA Gleich.
Anode am Occiput	(Versuch 6)		20 mA Impuls.
Unter Haut implantiert	7	6	20 mA Gleich.
fronto-occipital	(Versuch 7-13)	(Versuch 7-12)	7-35 mA Imp.
bitemporal	2 (Versuch 14,15)	2	20 mA Gleich. 18 mA bzw. 60 mA Impuls.
Implantiert auf Meningen fronto-occipital	1 (Versuch 16)	1	5 mA Gleich. 9 mA Impuls.
Insgesamt	16	11	

Versuchsergebnisse:

1. Grundsätzlich ist es also möglich, mit der Methode nach Smith ein Analgesiestadium mit dem elektrischen Strom hervorzurufen. Von den 16 Versuchen wurde 11 mal eine Analgesie erreicht. Wir benötigten dazu 20 mA Gleichstrom und 7-35 mA Impulsstrom.

2. Die erfolgreich abgelaufenen Versuche waren nur bei implantierten Elektroden zu verzeichnen. Auf Grund unserer Versuche

muß festgestellt werden, daß die auf die Haut angelegten Elektroden für Elektronarkosezwecke ungenügend sind.

Inwieweit in Versuch Nr. 2 tatsächlich von einer Analgesie gesprochen werden darf, kann nicht entschieden werden, da durch die starke motorische Unruhe und die krampfartig kontrahierten Muskeln die Schmerzreaktion nicht sicher zu beurteilen war.

In Versuch Nr. 6, bei welchem die Kathode auf den Augen lag, konnte zwar ein Analgesiestadium erreicht werden, aber nur unter starken Unruheerscheinungen.

Tabelle Nr. 3

Analyse der Versuche, bei welchen die Elektroden unter die Haut, bzw. auf die Meningen implantiert worden waren.

	Versuchs Nr.	Verhalten der Tiere
Günstiger Verlauf	9,12,14,15	Augenlider geschlossen; Tonus der Muskulatur normal; höchstens leichte Fibrationen der Gesichts-,Nacken-, Vorder-und Hinterbeinmuskulatur.
Ungünstiger Verlauf	(8),11	Günstiges Analgesiestadium kann erreicht, aber nicht aufrechterhalten werden.
	(7),(16)	Günstiges Analgesiestadium kann erreicht werden, wird aber von heftigen Krampfanfällen unterbrochen.
	10	Reaktionslosigkeit auf Schmerzreize nur unter stark erhöhtem Muskeltonus und unter tonisch-klonischen Krämpfen zu erreichen.
Keine Analgesie	13	heftige klonisch-tonische Krämpfe.

In denjenigen Versuchen, die in der Tabelle Nr. 3 in Klammern stehen, können für den ungünstigen Verlauf Mängel in der Versuchsanordnung angeschuldigt werden:

Versuch Nr. 7,8: Auflösung der Kupferelektroden
Versuch Nr. 16 : Die Elektroden lagen auf den Meningen, so daß es infolge der starken Hitzeentwicklung zu Krampfanfällen kam.

In den Versuchen Nr. 10,11,13, konnte kein Fehler in der Technik gefunden werden. Warum diese Versuche so ungünstig verlaufen sind, kann nicht erklärt werden. Daraus ergibt sich folgende Schlußfolgerung:

3. Trotz vorsichtiger Beachtung der Technik, vor allem der Elektrodenbefestigung und des Elektrodenmaterials haftet der Elektronarkose ein beträchtlicher Unsicherheitsfaktor an, da sich nicht mit genügender Sicherheit voraussagen läßt, ob überhaupt ein Stadium der Schmerzlosigkeit erreicht werden kann (Versuch Nr. 13),

ob das erreichte Analgesiestadium auch aufrechterhalten werden kann (Versuch Nr. 11),

ob das Analgesiestadium nicht von heftigen Krampfanfällen begleitet ist (Versuch Nr. 10).

4. Das Analgesiestadium

Im günstigsten Falle lagen die Hunde während des Analgesiestadiums ruhig und unbeweglich auf dem Tisch, wobei Lidflackern bei geschlossenen Augen, Zuckungen der Gesichtsmuskulatur, erhöhter Muskeltonus und Fibrationen am Nacken und Vorderbeinen, manchmal auch der Hinterbeine als Begleiterscheinungen vorkamen. Der Tonus der übrigen Muskulatur war normal bis leicht erhöht. Häufig trat eine erhöhte Salivation und Sekretion der Nasenschleimhaut auf. Die Atmung war erschwert. Infolge der mehr oder weniger starken Kontraktion der Laryngsmuskulatur war das Exspirium und Inspirium verlängert.

Auch durch die Verlagerung der Elektroden innerhalb der Schädelkapsel waren die Muskelkontraktionen an Kopf und Nacken nicht abgemildert.

Die Stromstärke, bei welcher Analgesie eintritt, ist von Versuchstier zu Versuchstier sehr verschieden. Die Elektrodenanordnung (s. unter Kapitel " Einfluß der Elektrodenanordnung") ist dabei von wesentlicher Bedeutung.

5. Einleitung der Elektronarkose

Bei Gleichstromzufuhr zeigte ein Teil der Tiere keine auffälligen Reaktionen, gleichgültig ob der Gleichstrom schnell oder langsam appliziert wurde. Manche Tiere reagierten jedoch mit Kopfschütteln und geringer Unruhe. Häufig schleckten die Tiere über die Nasenspitze.

Die Zufuhr des Impulsstromes mit einer Geschwindigkeit von 1 mA/15 sec kann als befriedigend betrachtet werden. Bei einer schnelleren Steigerung muß man mit einem kurzzeitigen Atemstillstand (Versuch Nr. 5,6) oder mit tonisch-klonischen Krämpfen rechnen (Versuch Nr. 4). Durch eine langsamere Stromzufuhr wurde der Atemstillstand vermieden. Die Einleitungsphase war dabei für die Tiere nahezu immer schmerzhaft: sie winselten, jaulten und heulten. Eine Stromsteigerung führte häufig zu erhöhten motorischen Reaktionen: Fluchtbewegungen, Aufbäumen und bei höheren Stromstärken Krämpfe tonisch-klonischer Art. Manchmal kamen Defäkation und Urination vor.

f. Das Postnarkosestadium

Sofort nach Abschalten des Stromes erlangten die Tiere das Bewußtsein. Meist waren sie aber erschöpft oder müde und verzogen sich in eine Ecke um zu schlafen. Ein Fortbestehen der Analgesie konnte nicht beobachtet werden. In einem Falle (Versuch Nr. 14) jedoch reagierte der Hund bis zu 5 min. nicht auf oberflächliche Schmerzreize. Manchmal wurden sogar kataleptische Symptome (Versuch Nr. 10,11) beobachtet. Wenn während des Analgesiestadiums die Atembeschwerden hochgradig waren, hatten die Tiere postnarkotisch eine hochfrequente Hechelatmung.

b. Der Einfluß des Gleichstromes auf die Elektronarkose nach der Methode von Smith.

Smith (115-125) und auch Wageneder (137,138) hatten in ihren Versuchen beobachtet, daß eine Gleichstromkomponente eine gewisse beruhigende Wirkung auf die Elektronarkose habe.

Zur Überprüfung dieser Feststellung unternahmen wir 7 Versuche mit einem reinen Impulswechselstrom:

5 mal mit einem 100 Hz Impulswechselstrom,
2 mal mit einem 500 Hz Impulswechselstrom.

Versuchsprotokolle:

Versuch Nr. 17; Hund Nr. 1, 13 kg, 100 Hz Impulsstrom.
Elektrodenanordnung: Anode zwischen den Augen, Kathode am Occiput.
Elektrodenhalterung: Implantation unter die Haut.
Elektrodenmaterial : Anode aus Platin, Kathode aus Silber.
Initiale Stromzufuhr mit einer Geschwindigkeit von 1 mA/15 sec.
Schon vor Stromeinschaltung ist der Hund sehr appatisch. Er hat sehr starke Entzündungserscheinungen an den Elektrodenimplantationsstellen. Es besteht ein eitriger Ausfluß aus den Implantationsnähten. Der Kopf ist heiß und geschwollen.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Hundes
10^{13}		Versuchsbeginn
10^{18}	14 mA Impuls.	Bis zu dieser Stromstärke verhält sich der Hund sehr ruhig.
	15 mA Impuls.	Kontraktion der Nackenmuskulatur. Gestreckte Kopfhaltung.
	20 mA Impuls.	Ab dieser Stromstärke bei jeder Stromänderung Winseln und leises Jaulen.
10^{23}	25 mA Impuls.	Stark tonisierte Muskulatur. Preßatmung.
	30 mA Impuls.	Tonisch-klonische Krämpfe. Hochgradige Atembeschwerden.
10^{30}	43 mA Impuls.	Keine Analgesie. Sehr starke Krämpfe.
10^{35}		Strom wird abgeschaltet, weil Hund sonst wegen der verkrampften Atemmuskulatur zu ersticken droht. Nach einigen Minuten fällt der Hund in schnarchenden Schlaf.

Versuch Nr. 18; Hund Nr. 5, 20 kg, 100 Hz Impulsstrom.
Elektrodenanordnung, -halterung, -material, initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 17.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
10^{30}		Versuchsbeginn
	12 mA Impuls.	Bis zu dieser Stromstärke keine besondere Reaktion.
	13 mA Impuls.	Opistotonus. Aufstützen auf Vorderbeine.
	20 mA Impuls.	Fibrationen der Nackenmuskulatur.
	22 mA Impuls.	Heftiges Winseln bei jeder Stromänderung. Stark erhöhter Muskeltonus.
	30 mA Impuls.	Tonischer Dauerkrampf. Hund fällt zur Seite. Muskelzittern am ganzen Körper.
	35 mA Impuls.	Tonisch-klonische Krämpfe. Schnarchende Atmung.
	40 mA Impuls.	Krämpfe werden immer stärker. Atmung hochgradig erschwert. Keine Analgesie.
10^{37}		Strom wird abgeschaltet. Hund erholt sich nur langsam.

Versuch Nr. 19; Hund Nr. 6, 30 kg, 100 Hz Impulsstrom.
Elektrodenanordnung, -halterung, -material, initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 17.
Verhalten des Tieres ähnlich wie in Versuch Nr. 12.
Bei jeder Stromsteigerung oder -änderung Winseln. Während des Analgesiestadiums Fibrieren der Augenlider, der Lefzen, der Nacken-, Vorderbein- und Hinderbeinmuskulatur. Sonst liegt der Hund mit geschlossenen Augen auf dem Tisch ohne sich zu bewegen. Bei 38 mA Analgesie.

Versuch Nr. 20; Hund Nr. 6, 30 kg, 100 Hz Impulsstrom.
Elektrodenanordnung: bitemporal.
Elektrodenhalterung: Implantation.
Elektrodenmaterial : Silber.
Initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 17.
Verhalten ganz ähnlich wie in Versuch Nr. 19.
Bei 80 mA Analgesie.

Versuch Nr. 21; Hund Nr. 6, 30 kg, 500 Hz Impulsstrom.
Elektrodenanordnung: Anode an Stirn, Kathode am Occiput.
Versuchsanordnung sonst wie in Versuch Nr. 17.
Verhalten ganz ähnlich wie in Versuch Nr. 19.
Bei 60 mA Analgesie.

Versuch Nr. 22; Hund Nr. 1, 13 kg, 100 Hz Impulsstrom.
Elektrodenanordnung: Anode am Frontalhirn, Kathode am Occipitalhirn. Die Elektroden sind direkt auf die dura mater implantiert.
Elektrodenmaterial : Silber. Rund. Größe: etwa 1 cm^2.
Verhalten genau wie in Versuch Nr. 16.
Bei 8-11 mA Analgesie.

Versuch Nr. 23; Hund Nr. 1, 13 kg, 500 Hz Impulsstrom.
Versuchsanordnung wie in Versuch Nr. 22.
Verhalten ganz ähnlich wie in Versuch Nr. 16.
Bei 14-15 mA Analgesie.

Tabelle Nr. 4
Zusammenfassung der Elektronarkoseversuche mit reinem Impulsstrom, mit einer Frequenz von 100 Hz und 500 Hz.

Elektroden-anordnung	Anzahl der Versuche. Versuch Nr.	Häufigkeit d. erreichten Analgesie	Analgesie-stromstärke	Frequenz d Impulsstr
Unter d.Haut implantiert				
fronto-occipital	4 (17-19,21)	2 Nr. 19 Nr. 21	38 mA 60 mA	100 Hz 500 Hz
bitemporal	1 (20)	1	80 mA	100 Hz
Implantiert auf die Meningen				
fronto-occipital	2 (22,23)	2 Nr. 22 Nr. 23	8-11 mA 14-15 mA	100 Hz 500 Hz
Insgesamt	7	5		

Versuchsergebnis:
Von den 7 Versuchen mit reinem Rechteckimpulsstrom wurde 5 mal Analgesie erreicht.

Der Charakter der Einleitungsphase und des Analgesiestadiums unterschied sich nicht wesentlich von der Elektronarkose, die mit einer aus Gleichstrom und Impulsstrom kombinierten Stromart erzeugt wird. Doch hatten wir den Eindruck, daß manche Tiere weniger unruhig waren, als bei ausschließlicher Verwendung des Impulsstromes. Die Befunde von Smith und Wageneder konnten jedoch nicht voll bestätigt werden.

Der Unterschied, den wir im Vergleich beider Stromarten feststellen konnten, bestand darin, daß die Impulsstromstärken mit Gleichstrom etwas niedriger lagen, als bei reinem Impulsstromfluß (s. Tab. 5).

Tabelle Nr. 5
Vergleich der zur Analgesie notwendigen Impulsstromstärken mit und ohne Gleichstromfluß. Es wurde immer der Hund Nr. 6 verwendet.

Elektroden-anordnung	Versuche mit kombiniertem Gleichstrom plus Impulsstrom. Analgesiestromstärke	Versuche mit reinem Impulsstrom. Analgesiestromstärke
fronto-occipital	30 mA (Versuch Nr. 12)	38 mA (Versuch Nr. 19)
bitemporal	60 mA (Versuch Nr. 15)	80 mA (Versuch Nr. 20)

Mit Gleichstrom alleine konnte niemals eine Analgesie erzielt werden. Einmal wurde einem Hund (Nr. 1) über Elektroden, die direkt auf der dura mater lagen, eine Gleichstromstärke von 30 mA verabreicht. Es konnte keine besondere Reaktion festgestellt werden. Der Hund schüttelte höchstens etwas den Kopf, verhielt sich aber sonst ganz normal.

c. Elektronarkoseversuche nach der Methode von Smith mit Impulsströmen einer Frequenz von 500 Hz.

In weiteren Versuchen sollte überprüft werden, ob durch Frequenzerhöhung eine Einleitungsphase erzielt werden kann, die Zuckungen der Kopfmuskulatur vermeidet und die Muskelaktivität verringert, wie das von Smith (123) beobachtet wurde.

Zu diesem Zwecke unternahmen wir 2 Versuche mit einem mit Gleichstrom kombinierten Rechteckimpulswechselstrom mit einer Frequenz von 500 Hz und einer Impulsdauer von 0,2 msec und 2 Versuche mit diesem Rechteckimpulsstrom ohne Gleichstromkomponente.

Versuchsprotokolle:

Versuch Nr. 24; Hund Nr. 5, 20 kg, Kombinierter Strom.
Elektrodenanordnung : Anode zwischen den Augen, Kathode am Occiput.
Elektrodenhalterung : Implantation unter die Haut.
Elektrodenmaterial : Anode aus Platin, Kathode aus Silber.
Initiale Stromzufuhr: 20 mA Gleichstrom mit einer Steigerungsgeschwindigkeit von 3 mA/min. Dann Impulsstrom mit einer Steigerungsgeschwindigkeit von 1 mA/15 sec.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
9^{15}	20 mA Gleich.	Keine besondere Reaktion.
9^{30}	18 mA Impuls.	Bis zu dieser Stromstärke ist der Hund sehr unruhig; er winselt, quietscht, zuckt bei jeder Stromänderung zusammen. Manchmal beruhigt sich der Hund etwas. Erhöhter Speichelfluß. Opistotonus ab 15 mA. Preßatmung.
	22 mA Impuls.	Sehr starke Muskelanspannung. Erhebliche Muskelzuckungen. Kopf ist auf die linke Seite gedreht, kann nicht geradeaus gerichtet werden. Die Atmung ist hochgradig behindert. Keine Analgesie.
9^{37}		Strom muß abgeschaltet werden, um den Hund nicht zu gefährden. Hund ist sofort wach. Hechelatmung.

Versuch Nr. 25; Hund Nr. 6, 30 kg. Kombinierter Strom.
Elektrodenanordnung, -material, -halterung, initiale Stromzufuhr wie in Versuch Nr. 9.
Verhalten des Tieres ähnlich wie in Versuch Nr. 12. Bei jeder Stromsteigerung Winseln. Während des Analgesiestadiums Zittern der Augenlider, der Lefzen, der Nacken-, Vorderbein- und Hinterbeinmuskulatur.

Sonst liegt der Hund mit geschlossenen Augen auf dem Tisch ohne sich zu bewegen.

Bei 20 mA Gleich.
53 mA Impuls. — Analgesie — Versuchsdauer: 1 Stunde.

Die Versuche mit reinem Impulsstrom mit einer Frequenz von 500 Hz siehe Versuch Nr. 21,23.

Tabelle Nr. 6
Zusammenfassung der Elektronarkoseversuche mit einem Impulsstrom von 500 Hz.:

Elektrodenanordnung	Anzahl d. Versuche Versuch Nr.	Häufigkeit d.erreichten Analgesie.	Analgesiestromstärke	Stromart
Unter Haut implantiert				
fronto-occipital	3 (24,25) (21)	2 (Nr. 25) (Nr. 21)	20 mA Gleich 53 mA Impuls 60 mA	kombinierter Gleich. plus Imp. reiner Impulsstrom
Auf Meningen implantiert				
fronto-occipital	1 (Nr. 23)	1	14-15 mA Impuls.	reiner Impulsstrom
Insgesamt	4	3		

Versuchsergebnis:
Im Gegensatz zu Smith mußten wir feststellen, daß bezüglich der Einleitungserscheinungen und der Art des Analgesiestadiums, kein markanter Unterschied gegenüber einem Impulsstrom von 100 Hz zu ermitteln war. Die zur Analgesie erforderlichen Impulsstromstärken waren jedoch höher als bei 100 Hz (s. Tab. Nr. 7).

Tabelle Nr. 7
Vergleich der zur Analgesie notwendigen Stromstärken bei Impulsströmen von 100 Hz und 500 Hz.

Elektroden-anordnung Nr. des Versuchtieres	Analgesiestromstärke bei Impulsströmen von 100 Hz	Analgesiestromstärke bei Impulsströmen von 500 Hz
Unter Haut implantiert fronto-occipit. Hund Nr. 6	20 mA Gleichstrom 30 mA Impulsstrom (Versuch Nr. 12)	20 mA Gleichstrom 53 mA Impulsstrom (Versuch Nr. 25)
	38 mA Impulsstrom (Versuch Nr. 19)	60 mA Impulsstrom (Versuch Nr. 21)
Auf Meningen implantiert fronto-occipit. Hund Nr. 1	8-11 mA Impulsstrom (Versuch Nr. 22)	14-15 mA Impulsstrom (Versuch Nr. 23)

d. Der Einfluß der Elektrodenanordnung
(fronto-occipital, bitemporal)

Aus unseren Versuchen kann geschlossen werden, daß sowohl mit einer fronto-occipitalen als auch mit einer bitemporalen Elektrodenanordnung ein Analgesiestadium bei Hunden erreicht werden kann.
Doch können geringfügige Differenzen registriert werden:

1. Bei einer bitemporalen Elektrodenanordnung wenden die Tiere den Kopf auf die Seite der Anode, wenn die kombinierte Stromart nach der Methode von Smith verwendet wird (s. Vers. 14,15).

2. Bei einer fronto-occipitalen Elektrodenanordnung besteht die Möglichkeit, daß der N. trigeminus verstärkt gereizt oder daß die Nasenschleimhaut direkt stimuliert wird, so daß es zum Niesen und zu erhöhter Sekretion, welche sogar blutig werden kann, kommt (s. Vers. 7,8,10,13).

3. Bei einer bitemporalen Elektrodenanordnung ist für das Analgesiestadium eine etwas höhere Stromstärke erforderlich als bei einer fronto-occipitalen (s. Tab. Nr. 8).

Tabelle Nr. 8
Vergleich der zur Analgesie notwendigen Stromstärken bei fronto-occipitaler und bitemporaler Elektrodenanordnung. Es wurde immer Hund Nr. 6 verwendet.

Analgesiestromstärke fronto-occipital	Analgesiestromstärke bitemporal	Stromart
38 mA (Versuch Nr. 19)	80 mA (Versuch Nr. 20)	100 Hz, reiner Impulsstrom
20 mA Gleich. 30 mA Impuls. (Versuch Nr. 12)	20 mA Gleich. 60 mA Impuls. (Versuch Nr. 15)	100 Hz, kombinierter Gleich- plus Impulsstrom.

c. Nachteile bei der Implantation der Narkoseelektroden:

Die Implantation der Narkoseelektroden unter die Haut und Muskelschicht hat den entscheidenden Vorteil gegenüber einer äußeren Anbringung der Elektroden, daß eine Verschiebung kaum eintreten kann. Doch bestehen auch einige Nachteile bei der von uns hauptsächlich verwendeten Elektrodenbefestigung:

1. Die Elektrodenplazierung muß durch eine kleine Operation vorgenommen werden.
2. Bei einem großen Teil der Versuchstiere entstehen am Ort der Narkoseelektroden nach längerer Stromapplikation hochgradige Verbrennungen (Abb. 9). Die Hunde können nach einer längerdauernden Elektronarkose nicht mehr zu Versuchszwecken verwendet werden.

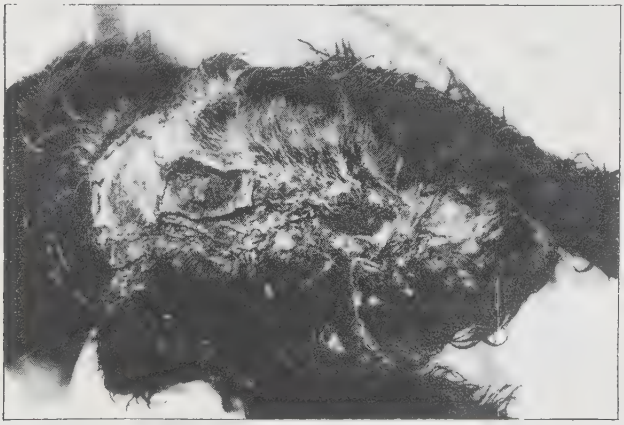


Abb. 9: Starke Verbrennungen nach 11-stündiger Elektronarkose, mit 20 mA Gleichstrom und bis zu 14 mA Impulsstrom.

Teil 2

Elektronarkoseversuche nach der Methode von Hardy, Fabian.

4 Versuche wurden mit einem Sinuswechselstrom mit einer Frequenz von 700 Hz unternommen. Pharmaka wurden nicht verwendet, wie sie von Hardy (35,36) und Fabian (21,22) reichlich bei der Elektronarkose zu Hilfe genommen wurden. Bei diesen Versuchen wurden den Hunden die Elektroden ausschließlich implantiert; 3 mal unter die Haut und die Muskelschicht, 1 mal direkt auf die Hirnhäute.

Versuchsprotokolle:

Versuch Nr. 26; Hund Nr. 1, 13 kg
Elektrodenanordnung: fronto-occipital:
Elektrodenmaterial : an Stirne Platin, am Occiput Silber.
Initiale Stromzufuhr mit einer Geschwindigkeit von 1 mA/15 sec.
Der Hund ist infolge der vorausgegangenen Versuch sehr apathisch.
An den Implantationsstellen sind starke Entzündungserscheinungen.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
9^{55}		Versuchsbeginn
10^{05}	30 mA	Mit zunehmender Stromstärke heftige Muskelagitationen. Fluchtversuche. Zittern am ganzen Körper. Jaulen, Winseln , bei höheren Stromstärken. Bei jeder Stromstärkeänderung Krämpfe. Hypalgesie.
	40 mA	Tonisch-klonische Krämpfe halten an, auch wenn die Stromstärke nicht verändert wird. Opistotonus. Stark erschwerte Atmung. Keine Analgesie.
10^{10}		Versuch wird abgebrochen, weil Hund sonst zu ersticken droht. Nach Abschalten des Stromes kataleptische Symptome. Langsame Erholung. Frequente Hechelatmung.

Versuch Nr. 27; Hund Nr. 5, 20 kg
Elektrodenanordnung: fronto-occipital.
Elektrodenmaterial : beide aus Kupfer.
Initiale Stromzufuhr mit einer Geschwindigkeit von 1 mA/3 min.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
8^{25}		Versuchsbeginn
	2 mA	Geringe Reaktion auf Stromerhöhung. Hund wird etwas unruhig.
8^{34}	4 mA	Zucken der Augenlider.
8^{36}	5 mA	Niesen.
8^{50}	12 mA	Starkes Niesen. Starkes Lidflackern.
8^{59}	16 mA	Hund wird immer unruhiger. Jaulen.
9^{07}	19 mA	Starke Salivation. Tonisch-klonische Krämpfe. Hechelatmung.
9^{16}	24 mA	Zunge zwischen die krampfhaft geschlossenen Kiefer eingeklemmt.
9^{24}	30 mA	Sehr starke tonisch-klonische Krämpfe. Harn- und Kotentleerung. Konvulsionen ähnlich wie bei einem Elektroschock. Preßatmung. Keine Analgesie. Stromstärke kann nicht weiter erhöht werden, da sonst das Tier gefährdet werden würde.
9^{50}		Im weiteren Verlauf sinkt die Stromstärke spontan langsam ab. Wenn die Spannung erhöht wird, erfolgt nach einem kurzen Anstieg wieder eine kontinuierliche Abnahme. Die Stromstärke nähert sich langsam dem Nullwert.
10^{15}		Versuch wird abgebrochen, Eine Erklärung für das Verhalten der Stromstärke konnte nicht gegeben werden. Keine Auflösung der Elektroden.

Versuch Nr. 28, Hund Nr. 7, 14,5 kg
Elektrodenanordnung: bitemporal.
Elektrodenmaterial : Silber.
Initiale Stromzufuhr mit einer Geschwindigkeit von 1 mA/2 min.

Uhrzeit	Stromstärke	Verhalten des Tieres
10^{55}		Versuchsbeginn
	8 mA	Bis zu dieser Stromstärke liegt der Hund ruhig auf dem Tisch. Nur manchmal leises Winseln. Vereinzelte Fluchtversuche. Manchmal Niesen.
11^{11}	9 mA	Heftigere Fluchtversuche. Winseln und Jaulen.
11^{15}	11 mA	Fibrationen der Kopfmuskulatur.
11^{30}	18 mA	Häufige Fluchtversuche. Verstärke Salivation. Preßatmung.
11^{46}	26 mA	Flackern der Augenlider.
12^{02}	35 mA	Sehr stark erhöhter Muskeltonus. Opistotonus. Zittern der gesamten Körpermuskulatur. Atmung sehr unregelmäßig.
12^{08}	37 mA	Tonische Krämpfe. Auch klonische Zuckungen. Harn-und Kotentleerung. Hypalgesie.
12^{10}	38 mA	Atmung setzt zeitweise aus.
12^{13}	40 mA	Heftige tonisch-klonische Krämpfe. Keine Analgesie.
12^{21}		Versuch wird abgebrochen, weil der Hund sonst wegen hochgradiger Atembeschwerden zu ersticken droht. Nach Abschalten des Stromes kataleptische Symptome. Langsame Erholung. Hochfrequente Hechelatmung.

Versuch Nr. 29, Hund Nr. 1, 13 kg
Elektrodenanordnung: Implantation auf die Hirnhäute. Eine Elektrode liegt rechts über dem Frontalhirn, die andere links über dem Frontalhirn.
Elektrodenmaterial : Silber. Rund, Größe: 1 cm^2.
Initiale Stromzufuhr mit einer Geschwindigkeit von 1 mA/15 sec. Der Hund bekommt zunächst bei einer Stromstärke von 6 mA eine tonische Muskelstarre mit Atemstillstand. Die Stromstärke muß wieder erniedrigt werden. Bei nochmaliger Stromzufuhr bis zu 6 mA dauert der Krampf nur etwa 30 sec. an. Danach Schmerzunempfindlichkeit auf oberflächliche Reize. Rezidivierend im Abstand von einigen Minuten tonisch-klonische Krämpfe. Der Versuch dauert etwa eine halbe Stunde. Nach Abschalten des Stromes liegt der Hund lange Zeit kataleptisch auf dem Tisch.

Tabelle 9
Übersicht über die Elektronarkoseversuche nach der Methode von Hardy, Fabian mit Sinuswechselstrom, Frequenz: 700 Hz.

Versuch Nr.	Versuchs-dauer	Strom-stärke	Erfolg
Implantierte Elektroden; fronto occipital:			
26 (Hund Nr.1)	13 min.	40 mA	Stark schmerzhafte Einleitungsphase. Heftige Muskelagitationen. Tonisch-klonische Krämpfe. Starke Atembeschwerden. Keine Analgesie. Hypalgesie. Postnarkotisch: kataleptisch.
27 (Hund Nr.5)	1 Std.u. 50 min.	30 mA	Schmerzhafte Einleitungsphase. Starke Unruhe. Sehr starke tonisch-klonische Krämpfe. Konvulsionen. Stark erschwerte Atmung. Keine Analgesie-
bitemporal:			
28 (Hund Nr.7)	1 Std.u. 26 min.	40 mA	Stark schmerzhafte Einleitungsphase. Heftige Befreiungsversuche. Tonisch-klonische Krämpfe. Starke Ateminsuffizienz, bzw. Apnoe. Hypalgesie. Postnarkotisch: kataleptisch.
Auf Meningen implantierte Elektroden; fronto-occipital:			
29 (Hund Nr.1)	30 min.	6 mA	Tonische Muskelstarre. Rezidivierend tonisch-klonische Krämpfe mit Atemstillstand. Schmerzlosigkeit auf oberflächliche Reize. Postnarkotisch: kataleptisch.

Versuchsergebnis:

Mit dem Sinuswechselstrom mit einer Frequenz von 700 Hz konnten wir keine vollständige Analgesie erreichen. Die Tiere hatten im günstigsten Falle eine Hypalgesie. Weitere Stromstärkeerhöhung brachten gesteigerte tonisch-klonische Krämpfe, Laryngospasmus und Atemstillstand. Vegetative Erscheinungen, wie Salivation, Urination und Defäkation waren verstärkt vorhanden. Nur bei einem Versuch, bei welchem die Elektroden den Meningen auflagen, war eine Unempfindlichkeit gegenüber oberflächlichen Schmerzreizen vorhanden.

Die Einleitungsphase war für die Tiere sehr schmerzhaft. Sie winselten und jaulten und versuchten energisch, sich zu befreien. Mit steigender Stromstärke nahm die Muskelstarre immer mehr zu und ging in tonisch-klonische Krämpfe über.

Nach Abschalten des Stromes waren die Tiere kataleptisch. Sie nahmen keinen Anteil an ihrer Umwelt. Nur langsam erholten sie sich. Wegen der vorausgegangenen schwerden Ateminsuffizienz atmeten sie hochfrequent und hechelnd.

Teil 3:

Potentialmessungen im Hundehirn während der Elektronarkose.

a. Minimale Rechteckwechselstromstärke, die gerade noch das Schädelinnere erreicht.

Im folgenden Versuch wurde die minimale Stromstärke des Rechteckimpulswechselstromes ermittelt, die das Schädelinnere, bzw. das Gehirn bei fronto-occipital implantierten Elektroden noch erreicht.

Versuchsanordnung:
Versuch Nr. 30; Hund Nr. 6, 30 kg
Froto-occipitale Anordnung der Narkoseelektroden. Implantation unter Haut und Muskelschicht.

Durch Bohrlöcher in der Kalotte wurden 2 runde Silberelektroden einer Größe von etwa 1 cm^2 auf die Hinrhäute gelegt. Die eine dieser Elektroden lag rechts über dem Frontalhirn, die andere links über dem Occipitalhirn. Nach Einlegen dieser beiden Ableiteelektroden wurden die Bohrlöcher mit einer Kunststoffharzmasse verschlossen.
Diese beiden Elektroden wurden mit einem Oszillographen verbunden, auf welchem die rechteckförmigen Spannungsstöße bei Fließen des Narkosestromes abgelesen werden konnten. Dieser Versuch wurde unter einer Trapanalnarkose durchgeführt.

Versuchsergebnis:

Wenn zwischen den Narkoseelektroden eine Rechteckimpulswechselstromstärke von 0,005 mA fließt, kann man auf dem Leuchtschirm des Oszillographen gerade noch eine Rechteckspannung sehen.

Die minimale Stromstärke des Rechteckimpulswechselstromes, die noch das Gehirn erreicht, liegt bei fronto-occipital implantierten Narkoseelektroden um 0,005 mA.

b. Nachweis eines Gleichstromflußes im Innern des Hundeschädels während einer Elektronarkose.

Nun sollte geprüft werden, ob der Gleichstromanteil des Smith'schen Narkosestromes in die Schädelkapsel überhaupt eindringt.

Versuchsanordnung:
Versuch Nr. 31; Hund Nr. 6, 30 kg
Plazierung der Narkose-und Ableiteelektroden wie in Versuch Nr. 30.

Die beiden Ableiteelektroden wurden diesmal mit einem einfachen Voltmeter verbunden.

Zur einfacheren Registrierung wurde über die Narkoseelektroden ein normaler Gleichstrom einer Stärke von 20 mA ohne einen Rechteckimpulswechselstromanteil geschickt.

Mit dieser Versuchsanordnung wurde die Potentialdifferenz zwischen den beiden Ableiteelektroden einmal ohne Stromfluß und einmal bei einer Gleichstromstärke von 20 mA gemessen.

Versuchsergebnis:

Potentialdifferenz zwischen den Ableiteelektroden ohne Stromfluß:	Potentialdifferenz zwischen den beiden Ableiteelektroden bei 20 mA Gleichstrom:
220 mV	440 mV

Damit ist bewiesen, daß eine Gleichstromstärke von 20 mA bei einer fronto-occipitalen Implantation der Narkoseelektroden unter die Haut und Muskelschicht den Schädelinnenraum erreicht, und in genügendem Maße das Gehirn beeinflussen kann.

c. Verteilung der Stromstärke im und am Hundeschädel während der Elektronarkose.

Ausgehend von den Versuchen von Wageneder (137) und Diemath (18) stellten wir eine Reihe von Experimenten an, um zu ermitteln, wie sich der Strom am und im Schädel des Hundes während der Elektronarkose bei fronto-occipital implantierten Elektroden verteilt. Dazu verwendeten wir folgende Versuchsanordnung:

Versuchsanordnung:
Anordnung der Narkoseelektroden: Anode frontal,
Kathode occipital.
Implantation der Narkoseelektroden unter Haut und Muskelgewebe.

Elektrodenmaterial: Anode Platin, Kathode Silber.
Elektrodengröße : 2 cm mal 2 cm; Dicke: 0,2 mm.
Die Hunde standen unter Trapanalnarkose. Nach dem Versuch wurden die Hunde getötet.

Um den Spannungsabfall in einem bestimmten Gewebsbezirk messen zu können, wurden 2 Meßelektroden konstruiert, von denen die eine in horizontaler, die andere in vertikaler Richtung den Spannungsabfall abgriffen. Jede Meßelektrode bestand aus 2 Elektroden, die an der Spitze einen Abstand von 3 mm haben.

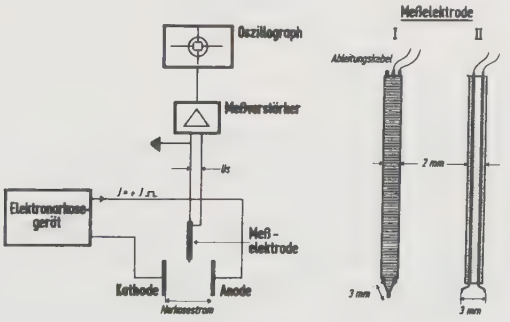


Abb. 10: Schaltschema und Ausführung der Meßelektroden für Potentialmessungen während der Elektronarkose.

Meßelektrode 1: (Abb. 10). Diese Elektrode besteht aus einer 2 mm dicken Röhre, in welche ein Draht eingelassen wurde. Röhre und Draht sind voneinander durch einen Lack isoliert. An der Spitze steht der Draht aus der Röhre soweit hervor, daß der Abstand zwischen Röhrenrand und Drahtspitze 3 mm beträgt, zwischen welchen der Spannungsabfall gemessen wird.

Meßelektrode 2: (Abb. 10). In einen Keramikstab wurden durch entsprechende Bohrungen 2 Elektrodendendrähte eingelassen. Am Ende der Meßelektrode liefen die beiden Drähte frei aus dem Keramikstab und wurden etwas auseinander gebogen, so daß der Abstand zwischen den beiden Drähten 3 mm betrug, zwischen welchen der Spannungsabfall gemessen wurde.

Die Meßelektroden wurden über einen Meßverstärker mit einem Oscillographen verbunden (s. Abb. 10). Der Hundeschädel wurde mit einem Rechteckimpulswechselstrom von 20 mA Stärke und einem 20 mA starken Gleichstrom durchströmt.

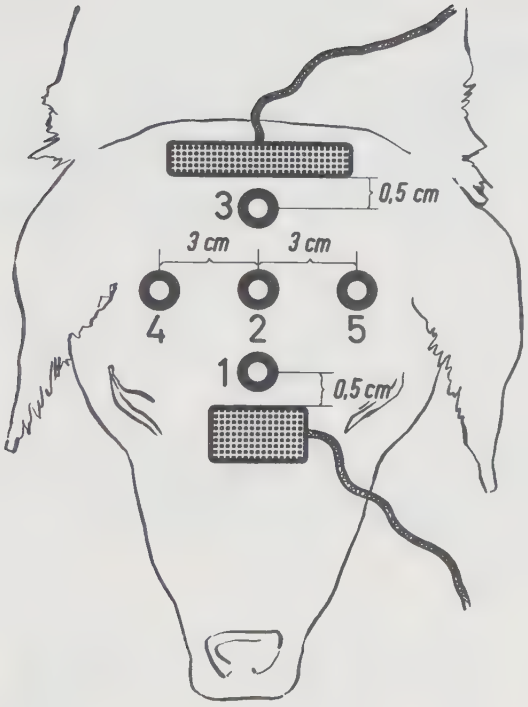


Abb. 11: Lage der Meßpunkte, durch welche die Meßelektroden für die Potentialmessungen eingeführt wurden.

Die Meßelektroden wurden an bestimmten Meßpunkten (s.Abb. 11) senkrecht durch Haut, Knochen, Liquorraum, Gehirn in die Tiefe gesenkt, nachdem durch den Schädel ein Loch gebohrt und durch das Gehirn mit der Meßelektrode ein Kanal gestochen worden war, und der jeweilige Spannungsausschlag am Oszillographen

abgelesen. Die Verbindungslinie der Endteile von Meßelektroden 1 kam senkrecht zur Achse, welche die beiden Narkoseelektroden verband, zu liegen, während die Verbindungslinie der Endpunkte von Meßelektrode 2 dabei parallel zu dieser Achse lag.

Versuchsprotokolle:

Versuch Nr. 32; Hund Nr. 5, 20 kg, Meßelektrode 1

Meßtiefe	Spannungsausschlag mV Meßpunkt 1	Spannungsausschlag mV Meßpunkt 2	Spannungsausschlag mV Meßpunkt 3	Spannungsausschlag mV Meßpunkt 4	Spannungsausschlag mV Meßpunkt 5
Unter Haut	600	200,240	600	210	
0,5 cm ab Schädel	70	35		44	
1,5 cm "		100		50	
2 cm "		50		40	
3 cm "	33,80	30		40	
4 cm "	55	40		10	
(Schädelbasis)					

Versuch Nr. 33; Hund Nr. 7, 14,5 kg, Meßelektrode 1

Unter Haut	700	200,300	600	100	160,200
0,5 cm ab Schädel		70, 80			80, 70
1 cm "		60		40	50
2 cm "		30		40	50
3 cm "		80		30	50
4 cm "		40		40,25	20
5 cm "		50		30	
(Schädelbasis)					

Versuch Nr. 34; Hund Nr. 4, 18 kg, Meßelektrode 2

Unter Haut	700	400,200	600	200	250
0,5 cm ab Schädel	80	70	90	60	70
1 cm "	60	10,50		40,50,60	40,50
2 cm "	40	30		30,50	40,40
3 cm "	50	85		30,40	40,20
4 cm "	40	40		40	50
5 cm "	40,60	50		30,40	30,40

Versuchsergebnis:

Da der Meßkanal mit Blut ausgefüllt war und der Abstand zwischen den beiden Endstücken einer Meßelektrode immer gleich (3 mm) gehalten wurde, war bei diesen Messungen auch der Widerstand annähernd immer konstant. Deswegen kann auf Grund des Ohm'schen Gesetzes (I = U/R) aus den unterschiedlichen Spannungsabfällen auf die Stromstärkeverteilung, bzw. auf die Verteilung der Stromdichte - wegen des gleichbleibenden Ausmaßes des abgegriffenen Gewebebereiches - geschlossen werden.

Bei fronto-occipitaler Stromdurchflutung fanden wir unter der Haut im Bereich der Narkoseelektroden die höchsten Spannungsausschläge, bzw. die größte Stromdichte. In der Mitte zwischen den beiden Elektroden hatten wir etwas geringere Potentiale gemessen. Direkt unterhalb der Schädeldecke sank die Stromdichte weiterhin ab und war im Hirngewebe am niedrigsten. Bei genauer Ventrikelpunktion lag die Stromstärke etwas höher als im umliegenden Hirngewebe. Diese Messungen konnten nur qualitative, jedoch keine quantitativen Ergebnisse liefern.

Unter der Haut

im Bereich der Elektroden	:	600 - 700 mV
zwischen den Elektroden	:	200 - 400 mV
direkt unter der Schädeldecke	:	70 - 90 mV
im Hirngewebe	:	40 - 60 mV
in den Ventrikeln	:	etwa 80 mV

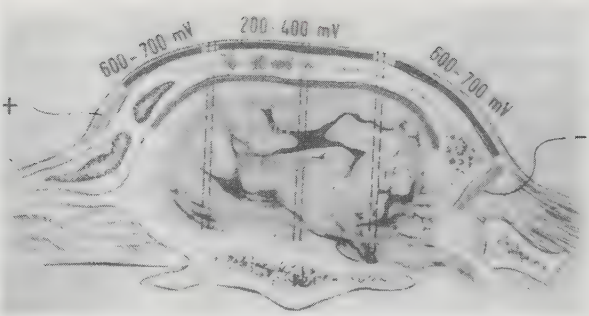


Abb. 12: Potentialmessungen unter Elektronarkose mit 20 mA Rechteckimpulswechselstrom und 20 mA Gleichstrom bei frontooccipital implantierten Narkoseelektroden. Die in den Querschnitt des Hundeschädels einprojezierten Linien stellen Gewebsbezirke mit gleichen Potentialen dar.

d. Das Verhältnis der spontanen biologischen Gehirnpotentiale zu den Potentialausschlägen, die im Gehirn während einer Elektronarkose gemessen werden.

Nun sollte ermittelt werden, in welcher Relation die Amplituden der biologischen Gehirnpotentiale zu den Spannungsstößen stehen, die durch einen Narkosestrom von 20 mA Rechteckimpulswechselstrom dem Gehirn zugeführt werden.

Versuchsanordnung:

Versuch Nr. 35; Hund Nr. 4, 18 kg
Es wurden in Meßpunkt 1 und 3 zwei Meßelektroden vom Typ Nr. 1 etwa 3,5 cm in das Gehirn eingeschoben. Hierbei wurden die Meßelektroden nicht als bipolare, sondern als unipolare verwendet. Mittels eines Oszillographen wurden die maximalen Amplituden der spontanen Hirnpotentiale, die sich zwischen diesen beiden Elektroden ausbildeten, gemessen. Anschließend wurde das Gehirn mit einem Rechteckimpulswechselstrom von

20 mA durchflutet und die Amplituden der Spannungsstöße, die durch den Narkosestrom zwischen den beiden Meßelektroden hervorgerufen wurden, auf dem Schirm des Oszillographen registriert.

Versuchsergebnis:

Maximale Amplitude der biologischen Hirnpotentiale: 0,1 mV

Spannungsamplituden, durch den Narkosestrom hervorgerufen : 300 mV

Also:

Quotient $\frac{\text{Gehirnpotential}}{\text{Potential, durch Narkosestrom hervorgerufen}} = 1 : 3000$

IV. Diskussion

Die Berichte von Anan'ev (4) und Smith (121) schienen gezeigt zu haben, daß der entscheidende Durchbruch in dem Bemühen, mit dem elektrischen Strom eine brauchbare Narkose hervorzurufen, gelungen ist. Nach ihren Angaben konnten mit einem Rechteckimpulswechselstrom, der einem Gleichstromgrundpegel überlagert ist, die motorischen Reizerscheinungen, die bisher bei der Anwendung von Impulsströmen oder Wechselströmen verschiedenster Art aufgetreten sind, ausgeschaltet und ein sicheres Analgesiestadium erreicht werden. Durch eigene Untersuchungen sollten diese Beobachtungen nachgeprüft werden.

Wir konnten bestätigen, daß mit dem Gleichstrom überlagerten Rechteckimpulswechselstrom mit einer Frequenz von 100 Hz bei Hunden ein Analgesiestadium erreicht werden kann (20 mA Gleichstrom, 7-35 mA Impulsstrom), sowohl mit einer fronto-occipitalen, als auch mit einer bitemporalen Elektrodenanordnung. Wenn die Elektroden zu beiden Seiten des Schädels an den Schläfen angelegt wurden, wendeten die Tiere den Kopf zur Anodenseite. Dieses Verhalten deuteten wir als eine starke Reizwirkung des Stromes auf das Gleichgewichtsorgan, da einerseits bei bitemporaler Anordnung die Elektroden dem Vestibularapparat sehr nahe liegen, andererseits bei Querdurchströmung des Kopfes der Strom die meatus acustici als Eintrittspforten zum Gehirn benützt. Bei einer fronto-occipitalen Elektrodenanordnung war die Sekretion aus der Nase erhöht. Das kam nach unserer Ansicht dadurch zustande, daß entweder der n. trigeminus oder direkt die Nasenschleimhaut durch die frontale Elektrode, die die diesen Bezirken sehr nahe lag, gereizt wurden.

Bei unseren Versuchen hatte die Anlage der Elektroden auf die Haut (6 mal), wie sie von den meisten Untersuchern angegeben wurde, keinen, bzw. nur sehr geringen Erfolg: Nie konnten wir damit ein Analgesiestadium erzielen. Bei dieser äußeren Elek-

trodenbefestigung sind starke Stromstärkeschwankungen die Regel. Verschiebungen der Elektroden kommen, wenn sie mit Bändern auf dem Schädel gehalten werden, wegen der naturgemäßen Unruhe und der sehr verschieblichen Kopfhaut der Hunde, immer vor. Dadurch wird der Übergangswiderstand zum darundergelegenen Gewebe verändert, woraus erhebliche Schwankungen der Stromstärke resultieren. Die Tiere bekommen bei jeder Änderung der Stromstärke einen kleinen elektrischen Schlag, worauf sie mit starken Muskelagitationen reagieren. Durch diese heftigen Bewegungen werden die Elektroden noch mehr verschoben; daraus ergeben sich wiederum stärkere Stromstärkeschwankungen und nach Art eines circulus vitiosus werden die heftigen Excitationen immer mehr hochgeschaukelt, bis starke Krämpfe auftreten. Die Symptomatik der Elektronarkose wird durch solche Vorfälle natürlich vollkommen verwischt.

Ganz abgesehen von der Unmöglichkeit der praktischen klinischen Anwendung ist die Implantation der Elektroden direkt auf die Meningen nicht günstig, da es durch Verbrennungen Parenchymausfälle des Gehirns gibt und außerdem die Bezirke, die unter den Elektroden liegen, sehr stark gereizt werden, so daß es zu Krampfanfällen kommt.

Aus diesen Gründen gingen wir dazu über, die Elektroden unter die Haut und Muskelschicht zu implantieren. Wir nahmen dabei gerne in Kauf, daß durch den längeren Stromfluß stärkere Verbrennungen vorkommen, als wenn die Elektroden der Haut, die relativ widerstandsfähig gegenüber Wärme ist, aufliegen; denn es kam uns darauf an, das Verhalten der Tiere bei denkbar günstiger Elektrodenbefestigung zu studieren. Wenn die Elektroden implantiert wurden, waren die Stromstärkeschwankungen ausgeschaltet.

Mit dieser Elektrodenplazierung erreichten wir in 9 von 10 Versuchen eine Analgesie. Doch waren immer motorische Erregungserscheinungen vorhanden. In der stets schmerzhaften Einleitungsphase wurden mäßige bis starke Muskelagitationen, auch tonisch-

klonische Krämpfe beobachtet. Während des Analgesiestadiums kamen Muskelfibrationen am Kopf, Nacken, Extremitäten, erhöhter Muskeltonus, in einem Fall sogar tonisch-klonische Krämpfe vor. Defäkation und Urination waren häufige Begleiterscheinungen. Es konnte aber nicht entschieden werden, ob die Exkretion von Faeces und Urin nur eine Folge der stärkeren Bauchdeckenanspannung war oder aber durch Reizung der vegetativen Zentren im Gehirn ausgelöst wurde. Postnarkotisch waren die Tiere als Folge der Muskelaktivität erschöpft. Die von Smith (123) vorgeschlagene Steigerung der Frequenz auf 500 Hz brachte keine Besserung. Es waren nur höhere Stromstärken für die Analgesie nötig. Impulsströme sind eben Reizströme, die nicht nur das Schmerzempfinden beeinträchtigen, sondern auch die motorischen Hirnzentren stimulieren. Durch 4 Versuche, bei welchen die Elektroden unter die Schädelkalotte implantiert wurden, konnte gezeigt werden, daß die Muskelfibration an Kopf und Nacken durch Reizung des Gehirns und nicht durch direkte Erregung dieser Muskelgruppen zustande kamen. Mit Scheminzky (108) sind wir der Ansicht, daß mit Impulsströmen jeglicher Art die Muskelaktivität nicht vermieden werden kann.

Als eine wesentlich ernster zu nehmende Komplikation der Elektronarkose sind die beträchtlichen Atembeschwerden anzusehen. Sie sind eine Folge der Atemwegsbehinderung. Sowohl die kontrahierte Kehlkopfmuskulatur, als auch die stark erhöhte Sekretion des Respirationstraktes führen zu einer erheblichen Erschwerung der Ex-und Inspiration. Nach der Elektronarkose versuchten die Tiere, durch starke Hechelatmung die durch die behinderte Atmung entstandene Azidose wieder zu beseitigen.

Natürlich könnte man durch Gaben von Muskelrelaxantien eine Erschlaffung der Muskulatur und durch endotracheale Intubation, künstliche Beatmung und Atropinapplikation eine gute Luftzufuhr herbeiführen. Freilich würde durch Verwendung der Pharmaka der hauptsächliche Vorteil der Elektronarkose, daß die vitalen Zellfunktionen aller Organe außer des Gehirns unbeeinflußt bleiben, verringert werden. Abgesehen davon würde trotz dieser Hilfsmittel die Elektronarkose für die praktische klinische Anaesthesie unbrauchbar sein, da zwei Tatsachen den Wert der Elektronarkose entscheidend vermindern:

1. Trotz genauer Beachtung der Elektrodentechnik kann nicht mit ausreichender Sicherheit ein Analgesiestadium erreicht werden. In einem von 10 Versuchen war es uns nicht möglich, auch nicht durch extreme Steigerung der Stromstärke eine Schmerzunempfindlichkeit zu erzielen. Eine Erklärung dafür kann nicht gegeben werden.
2. Es ist nicht mit Gewißheit vorauszusagen, ob das Analgesiestadium auch aufrechterhalten werden kann. Bei einem Versuch ließ die Schmerzunempfindlichkeit langsam nach und konnte auch nicht durch maximale Erhöhung der Stromstärke wieder erreicht werden. Dabei könnte der erhöhte Übergangswiderstand zum Gehirn durch Verbrennungen unter den Elektroden eine Rolle spielen. Auch kann daran gedacht werden, daß sich das Gehirn an die Stromdurchflutung gewöhnt und daß das Schmerzerlebnis wieder normal verarbeitet werden kann.

Man könnte einwenden, daß bei unserer Elektrodentechnik der Strom viel zu wenig auf das Gehirn einwirken kann. Aus diesem Grund verließ Smith in seinen neueren Untersuchungen die fronto-occipitale Elektrodenanordnung bei Hunden und brachte die Elektroden am Scheitel und im Mund am Gaumen an. Wir konnten jedoch zeigen, daß bei fronto-occipitaler Elektrodenimplantation unter die Haut und Muskelschicht das Gehirn einem starken Stromfluß ausgesetzt ist. Wenn 0,005 mA Impulsstrom noch in das Gehirn eindringt, so wird ein etwa 5000 mal stärkerer Strom eine genügend eingreifende Wirkung auf das Gehirn ausüben.

Ein wichtiger Punkt unserer Beobachtungen ist, daß der Kombination des Gleichstromes mit einem Rechteckimpulswechselstrom keine größere Bedeutung zukommt; denn der Impulsstrom alleine vermag genauso eine Analgesie herbeizuführen. In 7 Versuchen erzielten wir 5 mal eine Analgesie. Jedoch waren manche Tiere bei Verwendung des reinen Impulsstromes etwas unruhiger. Dies wird verständlich dadurch, daß die für eine Analgesie notwendige Impulsstromstärke ohne Gleichstromgrundpegel etwas höher liegt, als bei einer Gleichstrom-Impulsstrom-

Kombination. Die stimulierende Wirkung des Impulsstromes kann also durch Verwendung des Gleichstromes geringer gehalten werden. Doch bei unseren Versuchen genügten häufig schon die Impulsstromstärken trotz der Kombination mit Gleichstrom, um die motorischen Reizerscheinungen und Atembeschwerden hervorzurufen. Jedenfalls ist bei unseren Experimenten die beruhigende Wirkung des Gleichstromes nicht so markant, wie Anan'ev (4), Smith (123) und Wageneder (138) beobachteten.

Den möglichen Einwand, daß bei unserer Versuchsanordnung der Gleichstrom kaum das Gehirn erreicht hat, konnte widerlegt werden: Die Spannungsdifferenz zwischen fronto-occipital auf den Meningen implantierten Elektroden erhöhte sich um das doppelte, wenn ein Gleichstrom von 20 mA dem Gehirn zugeführt wurde. Die Elektroden, welche den Gleichstrom applizierten, waren fronto-occipital unter die Haut und Muskelschicht implantiert. Mit diesem Versuch wurde gezeigt, daß mit unserer Elektrodentechnik der Gleichstrom im genügenden Maße auf das Gehirn einwirken kann.

Hardy (36) und Fabian (21,22) berichteten in jüngster Zeit über erfolgreiche Narkosen bei Operationen an Menschen. Sie verwendeten einen Sinuswechselstrom mit einer Frequenz von 700 Hz und benötigten Stromstärken zwischen 50-110 mA, sowie Barbiturate und Muskelrelaxantien, außerdem eine endotracheale Intubation und Atropin. Auch wir untersuchten den 700 Hz-Sinuswechselstrom, aber ohne Unterstützung mit Pharmaka und Intubation.

Niemals konnten wir mit dieser Stromart eine vollständige Analgesie erreichen, im günstigsten Falle eine Hypalgesie. Nach einer sehr schmerzhaften Einleitungsphase steigerten sich regelmäßig die Muskelagitationen über eine tonische Muskelstarre bis zu heftigen tonisch-klonischen Krämpfen mit hochgradiger Ateminsuffizienz, bzw. Apnoe. Starke Salivation, Harn- und Kotentleerungen kamen vor. Die Stromstärke durfte nicht höher geschraubt werden (bis 40 mA), da das Leben der Tiere sonst gefährdet wurde. Lediglich bei einem Versuch mit auf den

Meningen aufliegenden Elektroden konnte eine Schmerzunempfindlichkeit gegenüber oberflächlichen Hautreizen festgestellt werden. Auch hierbei traten rezidivierend tonisch-klonische Krämpfe auf.

Das Ausmaß der Schmerzen und Krämpfe übertraf bei weitem diejenigen, die als Nebenerscheinungen bei Verwendung der aus Gleichstrom und Rechteckimpulsstrom kombinierten Stromart festzustellen waren. Wenn Hardy und Fabian gute Ergebnisse erzielten, so kann das nach unserer Ansicht nur auf die Anwendung der chemischen Mittel (Barbiturate, Muskelrelaxantien, Atropin) und auf die Intubation zurückgeführt werden.

Nach dem heutigen Stand ist die Elektronarkose noch nicht für die praktische klinische Anaesthesie brauchbar. Die günstigste Stromart muß erst noch gefunden werden. Zusätzlich müßten noch 3 entscheidende Probleme gelöst werden:

1. Bis heute gibt es keine ausreichende Kriterien zur Beurteilung der Elektronarkosetiefe. Wir beobachteten nur die Reaktion auf starke Schmerzreize, wie starkes Zwicken in die Haut, Schwanzspitze und Pfoten, sowie tiefes Einstechen in die Muskulatur mit einer dicken Nadel. Da bisher nur die Schmerzreaktionen Aufschluß über die eingetretene Analgesie geben, können von vorneherein keine Muskelrelaxantien angewandt werden. Das EEG während der Elektronarkose kann nach Knutson (60) und Geddes (28) nicht in Relation zur Narkosetiefe gebracht werden.
2. Da die Elektroden dem Schädel angelegt werden, wird es bei längerer Stromflußdauer immer an der Haut und an den Muskeln Verbrennungen geben. Abgesehen von den Verbrennungen erzeugt der Strom allein schon starke Schmerzen. Wie sich bei unseren Versuchen gezeigt hat, fließt ein beträchtlicher, wenn nicht sogar der hauptsächlichste Stromanteil über die Haut, die gut durchbluteten Muskeln und über den Liquor ab. Er geht also für die Elektronarkose verloren und ruft, bevor die Analgesiestromstärken im Gehirn erreicht werden, starke Schmerzen in Haut, Muskel und Meningen hervor. Dieser "Verluststrom" ist nicht auszuschalten, wenn man den bisherigen Weg der Stromapplikation wählt.

3. Es muß noch exakt geklärt werden, daß die Hirnfunktion durch den Strom nicht geschädigt werden kann. Wir haben festgestellt, daß das Verhältnis von spontaner Hirnaktivität zu den durch den Narkosestrom hervorgerufenen Stromstößen 1:3000 beträgt. Demnach liegt die Gefahr einer Gehirnschädigung sehr nahe. Die bisher negativ ausgefallenen Ergebnisse anderer Untersucher, nach welchen das EEG nach der Elektronarkose unverändert blieb (21,43,116), können nicht zufrieden stellen. Man weiß z.B., daß nach Elektronarkosen, wie sie in der Psychiatrie verwendet wurden (25,74), sehr wohl psychische Veränderungen vorkommen, die nicht mit dem EEG erfaßt werden können. Man denke auch daran, daß nicht einmal eine so schwere Erkrankung, wie die Schizophrenie, im EEG dargestellt werden kann. Nur durch genaue psychologische Testverfahren könnte man mögliche cerebrale Schäden entdecken.

Die Frage, welcher Mechanismus der Elektronarkose zu Grunde liegt, ist nach wie vor ungelöst. Wir jedoch neigen sehr zu der Ansicht von Boruttau und Mann (10), daß der Elektronarkosestrom, der nach unseren Untersuchungen etwa 3000 mal stärker ist als die spontane Hirnaktivität, die komplexe und komplizierte Assoziations-und Integrationsfähigkeit des Gehirns zunichte macht. Nach dieser Theorie wäre also die gestörte zentrale Verarbeitung des aufgenommenen peripheren Reizes zu dem Erlebnis "Schmerz" die wesentliche Ursache der Analgesie. Der elektrische Strom würde somit das Gehirn vor allem funktionell - die Informationsverarbeitung - und nicht organisch, wie die chemische Narkose, beeinflussen. Das heißt jedoch nicht, daß nicht organische Schäden hervorgerufen werden können.

Abschließend soll hervorgehoben werden, daß die Elektronarkose nur in einem Punkt mit der chemischen Narkose verglichen werden kann: Das ist die Analgesie. Es kann also nicht von einer Elektronarkose, sondern höchstens von einer Elektroanästhesie gesprochen werden - ein Terminus, wie er in jüngerer Zeit im angelsächsischen Sprachraum gebraucht wird.
Da bei der Elektroanästhesie nicht in jedem Falle eine Analgesie erreicht und nicht vorausgesehen werden kann, welcher Grad der Schmerzunempfindlichkeit eintritt, müssen bis heute den ausgezeichneten chemischen Analgetika bei weitem den Vorzug gegeben werden, die noch zusätzlich den Vorteil gegenüber der Elektroanästhesie haben, daß die unerwünschten Nebenwirkungen minimal sind.

V. Zusammenfassung

Es wurden an Hunden mit einem Gleichstrom überlagertem Rechteckimpulswechselstrom mit einer Frequenz von 100 Hz 16 Versuche unternommen. 9 mal wurde eine Analgesie mit Stromstärken von 20 mA Gleichstrom und 7-35 mA Impulsstrom erreicht.

Wenn die Elektroden der Haut aufgelegt wurden (6 Versuche), konnte niemals ein ruhiger Zustand mit Analgesie erzielt werden. In 9 von 10 Versuchen bekamen wir eine Analgesie, wenn die Elektroden unter die Haut und Muskelschicht oder auf die Meningen (1 mal) implantiert wurden.

Diese Methode der Elektronarkose war mit einem entscheidenden Unsicherheitsfaktor belastet, trotz genauer Beachtung der Elektrodentechnik:

1. Es konnte nicht mit Sicherheit ein Analgesiestadium erreicht werden (1 mal).
2. Das Analgesiestadium konnte nicht immer aufrechterhalten werden (1 mal).
3. Das Analgesiestadium konnte von heftigen Krampfanfällen begleitet sein (1 mal).

Im Analgesiestadium traten als Nebenerscheinungen Lidflackern, Zuckungen der Gesichtsmuskulatur, Fibrationen der Nacken-, Vorderbein-, manchmal auch der Hinterbeinmuskulatur auf. Der Tonus der übrigen Körpermuskulatur war leicht erhöht. Die Atmung war mäßig bis stark erschwert.

Bei Gleichstromzufuhr zeigten die Tiere keine auffälligen Reaktionen. Bei einer Steigerung des Impulsstromes mit einer größeren Geschwindigkeit als 1 mA/15 sec mußte mit einem Atemstillstand gerechnet werden. Jede Stromerhöhung führte zu verstärkten motorischen Reaktionen, die sich bis zu Krämpfen tonisch-klonischer Art steigern konnten. Dabei kamen häufig Urination und Defäkation vor.

Postelektronarkotisch waren die Tiere meist müde und erschöpft. 1 mal wurde eine für wenige Minuten weiterbestehende Analgesie beobachtet. Meist bestand eine Hechelatmung. 2 mal waren auch kataleptische Symptome festzustellen.

Der Gleichstrom war für die Elektronarkose nicht von größerer Bedeutung. Manche Tiere verhielten sich etwas ruhiger, als bei reinem Impulsstrom.

Eine Steigerung der Frequenz auf 500 Hz brachte keine Besserung. Die Analgesiestromstärken lagen dabei etwas höher.

Zwischen einer fronto-occipitalen und bitemporalen Elektrodenanordnung bestehen folgende Unterschiede:

1. Bei einer bitemporalen Elektrodenanordnung wandten die Tiere den Kopf zur Anodenseite.
2. Bei fronto-occipitaler Elektrodenanordnung bestand eine stärkere Sekretion aus der Nase.
3. Bei einer bitemporalen Elektrodenanordnung liegen die notwendigen Stromstärken höher als bei einer fronto-occipitalen.

Mit einem Sinuswechselstrom mit einer Frequenz von 700 Hz konnte in 4 Versuchen mit fronto-occipital und bitemporal implantierten Elektroden keine Analgesie erreicht werden. Es traten sehr starke tonisch-klonische Krämpfe auf. Nur wenn die Elektroden dem Gehirn direkt auflagen, (1 Versuch), konnte eine oberflächliche Schmerzunempfindlichkeit erreicht werden.

Wenn die Narkoseelektroden fronto-occipital unter die Haut und Muskelschicht implantiert waren, erreichte ein Rechteckimpulsstrom eine Stärke von 0,005 mA gerade noch das Gehirn. Die für die Analgesie notwendigen Stromstärken waren also etwa 5000 mal höher.

Die Spannungsdifferenz zwischen fronto-occipital auf den Meningen implantierten Elektroden ist bei einer Gleichstromdurchflutung des Gehirns mit 20 mA etwa verdoppelt. Die stromzuführenden

Elektroden waren dabei fronto-occipital unter Haut und Muskelschicht implantiert.

Ein Großteil des Narkosestromes erreicht nicht das Gehirn, sondern fließt über Haut, Muskel und Liquor ab. Er geht also für die Elektronarkose verloren.

Das Verhalten der spontanen Gehirnpotentiale zu den Potentialausschlägen, die im Gehirn durch den Narkosestrom hervorgerufen werden, beträgt etwa 1:3000. Der Narkosestrom im Gehirn ist also etwa 3000 mal stärker als die biologischen Gehirnströme.

Es kann nicht von einer Elektronarkose gesprochen werden, sondern höchstens von einer Elektroanaesthesie.

L I T E R A T U R V E R Z E I C H N I S

1. ADANSON (1751), Nach Meyer Waarden (1954), Elektrische Fische , ETZ B 5:171-175
2. ALPERS B.J., MADOW L. (1948), Changes in brain associated with electronarcosis. Arch. Neurol. Psychiat. 60:366-375
3. ADLER P. (1932), Die Beeinflussung der Galvanotaxis und Galvanonarkose bei Fischen durch Narkotika und Coffein. Pflügers Archiv 230:113-128
4. ANAN'EV M.G., GOLUBEVA I.V., GUROVA E.V., KASCHEVSKAIA L.A., LEVITSKAIA I.A., KHUDYI Y.B. (1960), Preliminary data on experimental electronarcosis induced with apparatus of the scientific research institute of experimental surgical apparatus and instruments. Anaesthesiology 21:215-219
5. ARAYA J. (1882), Nach Scheminzky (1941)
6. BARK J. (1954), Über die Bestimmung der Narkosetiefe mit dem Elektroencephalogramm (EEG). Der Anaesthesist 3:73-77
7. BIKELES G., ZBYSZEWSKI L. (1920), Über den Einfluß der Reizung des Gehirns mittels Wechselströmen auf das herzhemmende und vasomotorische Zentrum sowie auf die Atmung. Pflügers Archiv 182:157-172
8. BLASIUS E., SCHWEIZER F. (1893), Elektrotropismus und verwandte Erscheinungen. Pflügers Archiv 53:493-543
9. BOCKELMANN (1902), Nach Flach (1957)
10. BORUTTAU H., MANN L. (1911), Handbuch der gesamten medizinischen Anwendung der Elektrizität. Verlag von Dr. Werner Klinkhardt. Leipzig. Zitat: Teil II S. 432
11. BURGE W.E., BURGE E.L., (1940), The effects of anesthetics on the electrical potential of the brain: further observations and demonstrations. Anesth. Analg. 19:102-105

12. BURGE W.E., PETEFISH CH., ARMITAGE J., SAUNDERS (1941), Electrical anesthesia. Anesth. Analg. 20:99-101

13. BURGE W.E., KONNS E.G. (1948), Electric anesthesia in relation to brain potential. Current researches. Anesth. Analg. 27:290-292

14. CAMERON D.F., McINTYRE J.W. (1963), The use of hypotensiv drugs durings electrical anesthesia. Canad. anesth. soc. J. 10:516-517

15. CASPERS H., (1959), Über die Beziehungen zwischen Dendritenpotential und Gleichspannung an der Hirnrinde. Pflügers Archiv 269:157-181

16. CLARK G.A., WALL T.F. (1934), Unconsciousness produced by electric currents. Quart. J. exper. Physiol. 24:85-94

17. D'ARSONVAL (1890), Nach Robinowitsch (1910)

18. DIEMATH H.E., WAGENEDER F.M., SCHUY ST., GENSER R. (1965), Potentialmessungen im Gehirn des Menschen während des Elektroschlafes bei stereotaktischen Hirnoperationen. Neurochirurgia 8:73-80

19. ELLIS C.H., WIERSMA C.A. (1945), Electronarcosis; influence on secretory acticity of pituary glands. Proc. Soc. Exper. Biol. and Med. 58:160-162

20. ENGELEN (1912), Die elektrische Narkose bei Fischen. Deutsche med. Ws. 38:1558

21. FABIAN L.W., HARDY J.D., TURNER M.D., MOORE F.J. (1961), Electrical anesthesia V. Survey of clinical progress with illustrativ cases. Anesth. Analg. 40:653-661

22. FABIAN L.W., HARDY J.D., TURNER M.D., MOORE F.J. (1964), A review of the present status of electronarcosis. Anesth. Analg. 43:78-97

23. FLACH A. (1958), Elektronarkose. Der Anästhesist 7:180-185

24. FLEISCH, Nach v. Neergard (1922)

25. FROSTIG J.P., van HARREVELD, REZNIK, TYLER, WIERSMA (1944), Electronarcosis in animal and man. Arch. Neurol. and Psychiat. 51:232-242

26. GALVANI (1737-1789), Aus Leibbrand Werner "Romantische Medizin". H. Goverts Verlag Hamburg/Leipzig (1937)

27. GEDDES L.A. (1965), Electronarcosis. Med. Electron Biol. Engg. 3, 1:11-26

28. GEDDES L.A., TURBES C.C., HINDS M., BARROWS W.F. (1965), The EEG during electronarcosis. Anesth. Analg. 44:305-312

29. GENSER R., SCHUY ST. (1965), Elektroschlaf und Elektronarkose. ETZ-A 86:280-281

30. GERSTNER H. (1936), Der Einfluß elektrischer Ströme von 0-10000 Perioden pro Sekunde auf den intraabdominalen Druck. Arch. f. exp. Path. 182:205-218

31. GILJAROWSKI W.A., LIWENZEW N.M., SEGAL J., KIRILLOWA S.S. (1956), Elektroschlaf. Veb Verlag Volk und Gesundheit. Berlin

32. GOWING D., UNDERWOOD R.J., HAUGEN F.P. (1964), Electrocardiographic studies during electronarcosis. Anesthesiology 25:668-671

33. GRAIN (1936), Nach Geddes 1965

34. GUALTIEROTTI T., MARTINIE E., MARZORATI A. (1943), Untersuchungen über die Elektronarkose. Mit besonderer Berücksichtigung der aktiven elektrischen Erscheinung des zentralen Nervensystems. Pflügers Archiv 246:359-371

35. HARDY J.D., TURNER M.D., McNEIL C.D. (1961), Electrical anesthesia. III. Development of a method and laboratory observations. J. Surg. Res. 1:152

36. HARDY J.D., FABIAN L.W., TURNER M.D. (1961), Electrical anesthesia for major surgery. JAMA 175:599-600

37. HARREVELD v. A., KOK D.J. (1934), Über Elektronarkose mittels sinussoidalen Wechselstrom. Arch. neerl. Physiol. 19:24-57

38. HARREVELD v. A., PLESSET M.S., WIERSMA C.A.G. (1942), The relation between the physical properties of electric currents and their electronarcotic action. Am. J. Physiol. 137:39-46

39. HARREVELD v.A., TYLER D.B., WIERSMA C.A.G. (1943), Brain metabolism during electronarcosis. Am. J. Physiol. 139:171-177

40. HARREVELD v. A., DANDLIKER W.B. (1945), Blood pressure during electronarcosis. Proc. Soc. Exper. Biol. and Med. 60:391-394

41. HENßGE E. (1955), Der heutige Stand der selektiven nieder frequenten Reiztherapie und Elektrodiagnostik. Neural-medizin 3:282-289, 357-367

42. HERIN R.A. (1963), Electrical anesthesia in the dog. J.A.V. M.A. 142:865-871

43. HERIN R.A. (1964), Induction technique changes and electro-encephalographic, body temperature and pupillary light reflex studies in dogs anesthetised with electric current. Am. J. Vet. Res. 25:739-746

44. HERMANN L. (1885), Eine Wirkung galvanischer Ströme auf Organismen, Pflügers Archiv, 37:457-460

45. HERMANN L. (1886), Weitere Untersuchungen über das Verhalten der Froschlarven im galvanischen Strom. Pflügers Archiv 39:414-419

46. HEPPNER F. (1965), Hirnchirurgische Untersuchungen über das Wesen des Elektroheilschlafes. Medizinische Klinik 22:870-874

47. HERTZ M.H. (1933), Aus Scheminzky 1941

48. HESS W.R. (1931), Aus Gualtierotti 1943

49. HOLMES F. (1935), On the alleged occurence of "Krampfstoffe" in acetone extracts of mammalian brain. J. of physiol. 85:400-408

50. HOLMES F. (1946), Electrical anesthesia and barbiturate basal narcosis. Experiments. Brit. J. Anesth. 20:45-54

51. HOLZER W. (1932), Über eine absolute Reizspannung bei Fischen. Pflügers Archiv 229:153-172

52. IVY A.C., BARRY F.S. (1932), Studies on the electric stunning of dogs. Am. J. Physiol. 99:298

53. JAKOBI W., MAGNUS G. (1925), Elektronarkose und Hirnödem. Zs. ges. Neurol. 98:708-721

54. KERBIKOV O.V. (1955), Tratment of mental disease by sleep. Lancet 1:744-745

55. KING B.D., SOKOLOFF L., WECHSLER R.L. (1952), The effects of l-epinephrine and l-norepinephrine upon serebral circulation and metabolism in man. J. clin. invest. 31:273

56. KLEMM W.R. (1964), A square-wave electrical anesthesia current generator. Anesthesiology 25:718-719

57. KLEMM W.R., O'LEARY T. (1964), Comparison of electrical parameters and thequality of electroanesthesia. Anesthesiology 25:776-780

58. KNUTSON R.C. (1954), Experiments in electronarcosis, preliminary study. Anesthesiology 15:551-558

59. KNUTSON R.C., TYCHY F.Y., REITMAN J.H., (1956), The use of electrical current as an anesthetic agent. Anesthesiology 17:815-825

60. KNUTSON R.C., BERGEN v. F.H., TORRES F., HAGFORS N.R., BAKKEN E. (1963), A method for recording electroencephalogramms during electrical anesthesia. Anesthesiology 24:728-731

61. KRAUS H., REIFFENSTUHL W. (1933), Vergleich von Galvanonarkose und Wechselstromnarkose bei Fischen und Fröschen. Pflügers Archiv 233:380

62. KROLL F.W. (1933), Über das Vorkommen von übertragbaren krampferzeugenden Stoffen im Hirn krampfender Tiere. Zt. f.d.ges. Neurol. u. Psychiat. 143:780-793

63. KROLL F.W. (1933), Über das Vorkommen von übertragbaren krampferzeugenden Stoffen im Hirn während des epileptischen Anfalles bei Mensch und Tier. Zt. f. d. ges. Neurol. u. Psych. 145:739-748

64. KROLL F.W. (1933), Über das Vorkommen von übertragbaren schlaferzeugenden Stoffen im Hirn schlafender Tiere. Zt. f. d. ges. Neurol. u. Psych. 146:208-218

65. LARSON S.J., SANCES A. JR., JACOBS J.E., (1964), The effect of electroanesthesia upon conduction over specific and non-specific corticipetal pathways. Trans. Amer. Neurol. Assoc. 89:194

66. LARSON S.J., SANCES A. JR., JACOBS J.E., (1964), Suppression of cerebral cortex by electrical anesthesia. Surgical Forum 15:397-398

67. LARSON S.J., SANCES A. JR., JACOBS J.E., (1965), Electro-anesthesia and conduction over corticipetal pathways. Arch. Neurol. 13:10-14

68. LECLERC (1910), Nach v. Neergard 1922, Nach Scheminzky 1941

69. LEDUC S. (1902), Nach Giljarowski 1956

70. LEDUC S. (1911), Der elektrische Schlaf. Archiv für phys. Medizin u. med. Technik 5:3-15, Leipzig. Zitat S. 8

71. LOEB J., MAXWELL S. (1896), Zur Theorie des Galvanotropismus. Pflügers Archiv 63:121-144

72. LOEB J., GERRY S. (1897), Zur Theorie des Galvanotropismus. Pflügers Archiv 65:41-47

73. LONGLEY E.O. (1949), Electrical anesthesia and electronarcosis. J. ment. Sc. 95:51-79

74. LOUCAS K.P. (1965), Electronarcosis at Guy's. Guy Hosp. Rep. 114:223-237

75. MACH E. (1875), Nach Scheminzky 1941

76. McINTYRE J.W., CAMERON D.F. (1964), Electrical anesthesia: the use of a combination of alternating and direct current in dogs. Canad. Anesth. Soc. J. 11:168-172

77. McINTYRE J.W., CAMERON D.F. (1965), Cranial application of pulsed direct electric current and random sound in dog. Canad. Anesth. Soc. J. 12:192-196

78. Mc NEIL C.D., TURNER M.D., HARDY J.D. (1958), Electrical anesthesia: some metabolic observations and comparisations. Surg. Forum 9:394

79. NAGEL W.A. (1895), Über Galvanotaxis. Pflügers Archiv 59:603-642

80. NEERGARD v. K. (1922), Experimentelle Untersuchungen zur Elektronarkose. Archiv. f. klin. Chir. 122:100-150

81. NICOLAI L. (1930), Über Elektrotaxis und Elektronarkose von Fischen. Pflügers Archiv 224:268-277

82. NOBILI (1830), Nach Ranke 1866

83. ONIMUS, LEGROS (1888), Nach Scheminzky 1941

84. PATERSON S., MILLIGAN W.L., (1947), Electronarcosis. Lancet 2:198-201

85. PAVLOW (1847-1936), Nach Bykow K.M., Lehrbuch der Physiologie VEB Verlag, Volk und Gesundheit, Berlin 1960. S. 746-747

86. POWERS M.F., WOOD W.B. (1964), Electrical anesthesia studies: divers effects. Anesth. and Analg. 43:385-392

87. POZNAK v. A., ARTUSIO J.F. (1962), Effect of stimulus, amplitude, frequency, duration and waveform on the production of electronarcosis. Anesthesiology 23:163-164

88. POZNAK v. A. (1963), Electrical anesthesia. Anesthesiology 24:101-107

89. PRICE J.H., DORNETTE W.H. (1963), Clinical experiences with electroanesthesia. A preliminary report of 50 administrations. Anesth. Analg. 42:487-495

90. RANKE J. (1866), Über die krampfstillende Wirkung des konstanten elektrischen Stromes. Zt. f. Biol. 2:398-416

91. REMAK R. (1851-1865), Nach Sudhoff, "Geschichte der Medizin", Verlag von S. Karger, Berlin 1922

92. ROBINOVITSCH L. (1910), Electric sleep and analgesia. Med. Res. (N.Y.) 78:1035

93. ROSE S., RABINOV D. (1945), Electrical anesthesia. Med. J. Aust. 1:657-659

94. ROSS P.S., ALLEN R.O. (1943), Electronarcosis. Anesthesiology 4:630-636

95. SACK G., KOCH H. (1933), Zur Frage der sog. Elektronarkose durch wiederholte Gleichstromstöße. Ztschr.f.d.ges. exper. Med. 90:349-364

96. SACK G., KOCH H. (1933), Elektronarkoseversuch: Untersuchungen über die Wirkung periodischer rechtwinkliger Gleichstromstöße. Ztschr.f.d.ges.exper.Med. 90:365-377

97. SAMSSONOW N. (1933), Beitrag zum Studium der Elektronarkose. Pflügers Archiv für d. ges. Physiol. 232:554-558

98. SANCES A.J., LARSON S.J., JACOBS J.E. (1963), Electronarcosis and evoked cortical responses. Science 141:733-735

99. SANCES A.J., LARSON S.J. (1965), Neurophysiological effects of electrical anesthesia. Exp. Neurol. 13:109-15

100. SCHEMINZKY F. (1924), Versuche über Elektrotaxis und Elektronarkose. Pflügers Archiv 202:200-216

101. SCHEMINZKY F. (1931), Körpergröße und Empfindlichkeit gegen den galvanischen Strom. Pflügers Archiv 228:548-564

102. SCHEMINZKY F. (1933), Nachweis polarer Durchlässigkeitssteigerung am elektrisch durchströmten Forellenei. Pflügers Archiv 232:808-820

103. SCHEMINZKY F. (1933), Über die Natur der Wechselstromnarkose bei Fischen. Pflügers Archiv 233:371-379

104. SCHEMINZKY F. (1936), Zur Physiologie der Galvanonarkose bei Wassertieren. Pflügers Archiv 237:273-283

105. SCHEMINZKY F. (1936), Über das Wesen der Galvanonarkose beim Frosch. Pflügers Archiv 237:284-294

106. SCHEMINZKY F. (1938), Der "galvanische Krampf" bei aufsteigender Durchströmung von Fröschen. Pflügers Archiv 241:44-53

107. SCHEMINZKY F. (1938), Bildung erregbarkeitssteigender Stoffe im Rückenmark des Frosches während elektrischer Durchströmung. Pflügers Archiv 241:54-70

108. SCHEMINZKY F. (1941), Elektronarkose. Tabul. biolog., 19 II Cellulae, Den Haag. S. 154-241

109. SCHUY ST., WAGENEDER F. (1965), Elektroheilschlaf und Elektronarkose mit Hilfe von gleichstromüberlagertem Breitbandrauschen. Elektromedizin 10:193-198

110. SRIPONIUS LARGUS (50 n. Chr.) Nach Diepgen P., "Geschichte der Medizin". Walter De Gruyter und Co. Berlin W 35. 1949. S. 113, 114

111. SHORT C.E. (1964), The application of electroanesthesia on large animals. J. Amer. Vet. Med. Assoc. 145:1104-6

112. SHORT C.E. (1965), Clinical effects of anesthesia produced by alternating electric current. Anesth.Analg. 44:517-521

113. SILVER M.L. (1939), Electrical anesthesia in rats. Proc. Soc. Exper. Biol. and Med. 41:650-651

114. SILVER M.L., GERARD R.W. (1941), Electrical anesthesia with constant current. Am. J. Physiol. 133:447

115. SMITH R.H., GOODWING C., FOWLER, SMITH G.W., VOLPITTO P.P. (1961), Electronarcosis produced by a combination of direct and alternating current. A preliminary study. 1. Apparatus and electrodes. Anesthesiology 22:163-168

116. SMITH R.H., GRAMLING Z.W., SMITH G.W., VOLPITTO P.P. (1961), Electronarcosis by an combination of direct and alternating current. 2. Effects on dog brain as shown by EEG and microscopic study. Anesthesiology 22:970-973

117. SMITH R.H., SMITH G.W., VOLPITTO P., GOODWING C., GRAMLING Z. (1961), Electroanalgesia (electronarcosis) in the experimental animal. Surg. Forum 12:388-390

118. SMITH R.H., CULLEN S.C. (1962), Electronarcosis by a combination af direct and alternating current. 3. Electrodes and electrode holders. Anesthesiology 23:682-686

119. SMITH R.H., CULLEN S.C. (1963), Electronarcosis-A progress report. Am. J. Med. Electronics 1:308-313

120. SMITH R.H., CULLEN S.C. (1963), Electrical anesthesia produced by a combination of direct and alternating current. J.A.M.A. 143:712-716

121. SMITH R.H. (1963), Electrical Anesthesia. C.C.Thomas and Co., Springfield Illinois USA

122. SMITH R.H. (1964), Electronarcosis by a combination of direct and alternating current. 4. Effect on some physiologic processes in the dog. Anesth. Analg. 43:59-65

123. SMITH R.H., HYLTON R.R., CULLEN S.C. (1965), Electronarcosis by a combination of direct and alternating current. Amer. J. of medical electronics Jan.-Mar. p. 38-41

124. SMITH R.H., HYLTON R.R., McCABE B.A., CULLEN S.C. (1965), Electrical anesthesia produced by a combination of direct and alternating current. Technical studies on the macaque monkey. Anesth. Analg. 44:275-279

125. SMITH R.H., RICHARDS R.K., RICHTER W.R., HYLTON R.R., McCABE J.R., CULLEN S.C. (1965), Electrical Anesthesia by combining direct and alternating currents:Electromicroskopy of the dog brain. Anesthesiology 26:607-611

126. STEPHEN V. (1959), Progress in electrical anesthesia: A critical review. Med. J. Austr. 20:831-833

127. STIEF A. (1933), Über die Wirkung des unterbrochenen Gleichstromes (Leduc'scher Strom) auf das Nervensystem. Arch. Psych. u. Nervenkr. 101:164-183

128. STRIMSKA J., VACEK A. (1960), Effect of electronarcosis an oxygen consumption and carbon dioxid output. Nature 187:151-152

129. THOMPSON G.N., McGINNES J.E., HARREVELD v. A., WIERSMA C.A. TIETZ E.B. (1944), Electronarcosis; clinical comparisation with electroshock. War. med. 6:158-160

130. TIETZ E.B., THOMPSON G.N., HARREVELD v. A., WIERSMA C.A. (1946), Electronarcosis and its application and therapeutic effect in schizophrenia. J. nerv. ment. Dis. 13 :144-165

131. TSCHAGOWETZ W. (1912), Über die Veränderung der reflektrotischen Erregbarkeit des intermittierenden Gleichstromes auf das Zentralnervensystem. Pflügers Archiv 146:567-577

132. TUFFIER, JARDY, (1907), Nach v. Neergard 1922

133. TZONIS K. (1935,1936), Nach Scheminzky 1941

134. ULIIE A. (1954), Die Kontrolle der Narkosetiefe mit dem Elektroencephalogramm. Der Anaesthesist 3:69-73

135. UNGER (1843), Nach Meyer-Waarden P.F., Halsband I. und E., Einführung in die Elektrofischerei. Westliche Berliner Verlagsgemeinschaft Heenemann KG, 1 Berlin 31 Wilmersdorf 1965

136. VOLPITTO P.P., SMITH R.H., GRAMLING Z.W., SMITH G.W. (1962), Electronarcosis with direct plus alternating current. Anesthesiology 23:164

137. WAGENEDER F.M., SCHUY ST., GENSER R. (1964), Potentialmessungen im Hundehirn während der Durchblutung mit Impulsströmen. Der Anaesthesist Bd. 13 Heft 11 S. 353-356

138. WAGENEDER F.M., SCHUY ST. (1965), Zur Elektronarkose im Tierversuch. Der Anaesthesist 15:10-13

139. WAGENEDER F.M., JENKNER F.L., HAFNER H. (1965), Zur Veränderung der zerebralen Hämodynamik während des Elektroschlafes, Deutsch. med. J. 16:229-35

140. WEDENSKI (1852-1922), Nach Bykow K.M., Lehrbuch der Physiologie. VEB Verlag, Volk und Gesundheit, Berlin 1960. S. 576-579

141. WOOD W.B., POWERS M.F., DORNETTE W.H.L., PRICE J. (1964), The cardiovasculary effects of cranially-impressed electric currents of anesthetic intensity. Anesth.Analg. 43:313-323

142. WULFSOHN N.C., McBRIDE W. (1962), Electronic anesthesia. SAFr Med. J. 36:941-943

143. ZEMAN W. (1959), Handbuch der speziellen Pathologie, Anatomie und Histologie Bd. XIII, 3, Berlin, Göttingen, Heidelberg. Springer.

144. ZIMMERMANN J. (1928), Untersuchungen über die Anwendbarkeit der elektrischen Betäubung nach Leduc bei chirurgischen Eingriffen an Hunden. Diss. München

145. ZICHEL H., KRAFT D., RITTENBACH P. (1965), Experimentelle Untersuchungen zur Elektronarkose. Der Anaesthesist 14:113-115

Mein besonderer Dank gilt Professor Dr. med. E. Rügheimer für die Überlassung des Themas und die stets bereitwillige Beratung während der Arbeit.

LEBENSLAUF

Am 14.10.1941 wurde ich als Sohn des Pfarrers von Veitlahm, b. Kulmbach, Friedrich Endsberger und seiner Frau Annemarie, geborene Wolfrum, in Nürnberg geboren. Im Sommer 1947 starb mein Vater an Kriegsfolgen.

Die 1. und 2. Klasse der Volksschule besuchte ich in Veitlahm, die weiteren 3 Klassen, nach dem Umzug meiner Familie im Jahre 1949, in Erlangen. 1952 ging ich in das Internat von Windsbach, wo ich die ersten 4 Klassen des humanistischen Gymnasiums absolvierte. Danach kam ich in das humanistische Gymnasium von Erlangen. Hier legte ich im Juni 1961 die Reifeprüfung ab.

Im Wintersemester 1961/62 begann ich das Studium der Medizin an der Universität Erlangen-Nürnberg. Nach bestandener ärztlicher Vorprüfung im Frühjahr 1964 in Erlangen, war ich für die beiden ersten klinischen Semester an der Universität Innsbruck immatrikuliert. An der Universität Erlangen-Nürnberg setzte ich das Studium fort.

Im Sommer 1967 habe ich an der Universität Erlangen-Nürnberg das medizinische Staatsexamen abgelegt.

Offsetdruck - Fotodruck
Josef Hogl
8520 Erlangen, Hauptstr. 109, (Nähe Martin-Luther-Platz,) Tel. 22990

Offsetdruck - Fotodruck

- J. Hogl, 8520 Erlangen, Hauptstr. 109, (Nähe Martin-Luther-Platz) Telefon 22990 -